

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko – geologická fakulta

Katedra environmentálního inženýrství

**VLIV PLASTOVÉHO RECYKLÁTU NA MECHANICKÉ
VLASTNOSTI VÝROBKŮ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:

Bc. Jakub Jedinák

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Miluše Hlavatá, Ph.D.

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Katedra environmentálního inženýrství

Zadání diplomové práce

Student: Jakub Jedinák
Studijní program: N2102 Nerostné suroviny
Studijní obor: 3904T022 Zpracování a zneškodňování odpadů
Téma: Vliv plastového recyklátu na mechanické vlastnosti výrobků
The influence of plastic recylcate on the product mechanical properties

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Kvalifikační práce bude vypracována v souladu se směrnicí HGF SME_15_001 a osnovou:

1. Úvod a cíl práce
2. Recyklace termoplastů (pozitiva/negativa, použité technologie, environmentální zátěž, využití..)
3. Metodika přípravy vstupní suroviny s přidavkem recyklátu
4. Vyhodnocení a diskuse výsledků
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-2710614-1.

KUTA, Antonín. Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007 dotisk. ISBN 978-80-7080-367-7.

ŘEHULKA, Zdeněk. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-833-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: Ing. Miluše Hlavatá, Ph.D.

Datum zadání: 31.10.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019




doc. Ing. Silvie Heviánková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.
děkan fakulty

Prohlášení

Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu. Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména S 35 - využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a S 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (S 35 odst. 3)

Souhlasím s tím, že jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.

Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencovaná pod Creative Commons AttributionNonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu S 12 odst. 4 autorského zákona.

Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněná v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Mostě dne 25. 4. 2019

Jedinák Jakub



Poděkování:

Tímto chci poděkovat vedoucí bakalářské práce Ing. Miluši Hlavaté, Ph.D., za pomoc, vstřícnost, a hlavně trpělivost při vypracování této práce. Dále chci poděkovat firmě UNIPETROL RPA, s.r.o. – POLYMER INSTITUTE BRNO za umožnění laboratorního měření, za ochotu při poskytování materiálů a fotografií jejího provozu a také své rodině.

Anotace:

Diplomová práce je zaměřena na recyklaci termoplastů a metodiku přípravy vstupní suroviny s přídavkem recyklátu. V teoretické části jsou popsány výhody a nevýhody recyklace, dále způsoby organizované recyklace a také druhy recyklace. Ty jsou popsány do podrobnějších postupů. Zároveň je představeno využití recyklátu v technologii vstřikování. Praktická část se věnuje testování. Metodika přípravy vstupní suroviny s přídavkem recyklátu popisuje provedené zkoušky mechanických vlastností materiálu.

Klíčová slova: recyklace, recyklát, vstřikování, vstupní surovina

Summary:

This master thesis is focused on the recycling of thermoplastics and the methodology of feedstock preparation with recycling additives. The theoretical part of the master thesis is interpreting the advantages and disadvantages of recycling, all possible recycling methods and the types of recycling. Detailed procedure of recycling flow is described along with the usage of recycled material in injection technology. The practical part is focused on testing and describes mechanical characteristics of tested material.

Key words: recycling, recycled material, injection, feedstock

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
2	RECYKLACE TERMOPLASTŮ.....	2
2. 1.	Výhody a nevýhody recyklace termoplastů	2
2. 2.	Polymery	2
2.2.1	Rozdělení polymerů	3
2.2.2	Recyklace jednotlivých druhů termoplastů	4
2.3	Způsoby organizované recyklace	6
2.3.1	Podniková recyklace	6
2.3.2	Mezipodniková recyklace	7
2. 4	Technologie granulace	7
2.4.1	Metody granulace	7
2. 5	Druhy recyklace.....	8
2.5.1	Materiálová recyklace	8
2.5.2	Chemická recyklace	18
2.5.3	Energetická recyklace	20
2.5.4	Surovinová recyklace	21
2. 6	Využití recyklátu v technologii vstřikování.....	22
2.6.1	Historie vstřikování.....	22
2.6.2	Technologie vstřikování.....	23
2. 7	Materiálová databáze a normy	28
3	METODIKA PŘÍPRAVY VSTUPNÍ SUROVINY S PŘÍDAVKEM RECYKLÁTU	31
3.1	Specifikace materiálu.....	31
3.2	Příprava materiálu	33
3.3	Zkoušky materiálu	34
3.3.1	Laboratorní zkoušky materiálu	35
4	VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ	52
4.1	Vyhodnocení tahových zkoušek.....	52
4.2	Vyhodnocení ohybových zkoušek.....	56

4.3 Vyhodnocení rázových zkoušek.....	59
5 ZÁVĚR.....	62
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	64
SEZNAM ZKRATEK.....	68
SEZNAM OBRÁZKŮ	69
SEZNAM TABULEK	70
SEZNAM GRAFŮ.....	71

1 ÚVOD

Termoplasty se řadí do skupiny polymerních materiálů a pronikly téměř do všech odvětví zpracovatelského průmyslu, a to zejména do obalového, elektronického, elektrotechnického a v neposlední řadě do automobilového průmyslu. V automobilovém průmyslu se termoplasty využívají hlavně z důvodu ušetření hmotnosti, jednoduchosti výroby a zvýšení bezpečnosti. Mezi další důležité vlastnosti patří minimální nároky na údržbu, dlouhá životnost a vysoká odolnost vůči degradaci a chemikáliím.

Tím, že termoplasty mají své specifické vlastnosti stávají se tak problematickým odpadem a jsou zařazovány mezi největší zdroj znečištění životního prostředí. Z tohoto důvodu je důležité zvolit pro ně vhodnou recyklaci.

V současné době je na recyklaci kladen velký důraz hlavně ze strany podniků, kde se snaží opětovně využít technologický odpad. Ten vzniká při výrobě výrobků v podobě neshodných dílů nebo zbytků vtokových systémů. Z tohoto důvodu tak podniky nejčastěji volí recyklaci formou drcení. Tento způsob recyklace spočívá v rozdrcení technologického odpadu, po kterém může následovat případná regranulace. Vzniklá drť nebo regranulát se tak obvykle použije zpět ve výrobním procesu. Tím, že se přidává drť nebo regranulát k základnímu materiálu může dojít ke změně technologických a užitných vlastností materiálu.

Z tohoto důvodu se provádí zkoušky mechanických vlastností materiálu, které sledují vlastnosti materiálu při působení mechanických sil. Mezi nejčastější zkoušky patří tahové a ohybové vlastnosti a také rázová houževnatost materiálu.

Hlavním cílem diplomové práce je posouzení, do jaké míry lze přidávat recyklát k základnímu materiálu, tak aby nedošlo k ovlivnění jeho mechanických vlastností při výrobě plastových dílů technologií vstřikování.

2 RECYKLACE TERMOPLASTŮ

Pojem recyklace pochází z anglického slova „recycling“, což znamená znovuvyužití nebo vrácení odpadu zpět do výrobního procesu. V oboru vstřikování plastů mezi odpad patří odstříky polymerní taveniny do volného prostoru, neopravitelné zmetky a také vtokové zbytky. [1]

Recyklace termoplastů je definována jako opětovné nebo další využití v původní nebo pozměněné formě. V tomto případě se tak odpad vrací zpět do výrobního procesu, a to jak pro původní účel a stejný výrobní systém nebo i pro jiný účel, kdy může být odpad prodán specializované firmě, která ho zpracuje. [1]

2. 1. Výhody a nevýhody recyklace termoplastů

Nevýhody recyklace

- vysoké investiční náklady
- chemické vazby termoplastů – houževnatost
- negativní dopad na životní prostředí – vyšší množství tepla, které je potřebné k roztavení plastů vytváří emise uhlíku, které přispívají ke globálnímu oteplování [2]

Výhody recyklace

- úspora výrobních nákladů
- úspora materiálu
- lepší řízení výrobních toků
- ekologicky šetrná výroba [2]

2. 2. Polymery

Polymerní materiály a technologie pro jejich zpracování se používají takřka ve všech průmyslových odvětvích, kde se stále více prosazují jako konstrukční materiály. Polymery zahrnují širokou škálu chemického složení, různou vnitřní stavbu struktury a různé vlastnosti. Z chemického hlediska se jedná o makromolekulární látky přírodního nebo syntetického původu. [6]

Výhody polymerů

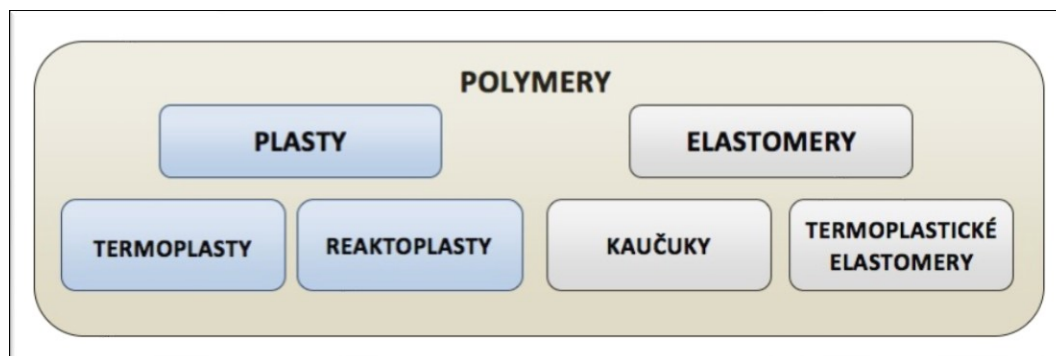
- nízká hustota materiálu
- tepelný a elektrický izolant
- odolnost proti povětrnosti a korozi
- chemická odolnost
- snadná zpracovatelnost
- nižší vynaložená energie při zpracování [6]

Nevýhody polymerů

- hořlavost materiálu
- odolnost proti nízkým teplotám
- vysoká teplotní roztažnost
- vytváření elektrostatického náboje
- nízká odolnost UV záření [6]

2.2.1 Rozdělení polymerů

Polymery se rozdělují podle několika kritérií, kde základní skupinou jsou plasty a elastomery což znázorňuje obrázek číslo 1.



Obrázek 1 Základní rozdělení polymerů [41]

Plasty

Jedná se o polymery, které jsou za běžných podmínek většinou tvrdé a často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. Pokud je změna z plastického do tuhého stavu vratná neboli opakovatelná jedná se o termoplasty. V případě, že jde o

změnu nevratnou neboli neopakovatelnou a trvalou, protože je výsledkem chemické reakce, jedná se o reaktoplasty. [5]

Elastomery

Jedná se o vysoce elastické polymery, které se můžou za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná. Typickým představitelem elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vulkanizací vyrábí pryže, což je vysoce pružný materiál, který je odolný proti trvalé deformaci. Dalším představitelem elastomerů jsou termoplastické elastomery, které jsou svými vlastnostmi podobné pryžím. Jejich struktura je ale tvořena tvrdými a měkkými segmenty, kde tvrdé segmenty tvoří termoplasty a měkké segmenty tvoří elastomery tím vzniká zesíťovaná struktura. Mezi výhodou termoplastických elastomerů patří možnost vstřikování na běžných strojích určených pro termoplasty a také možnost jejich opětovného zpracování formou recyklace. [5]

2.2.2 Recyklace jednotlivých druhů termoplastů

Z důvodu, že existuje několik druhů termoplastů, tak uvádím nejčastější druhy termoplastů a možnosti jejich recyklace.

Polyetylen (PE)

Polyetylen snáší při recyklaci i několik recyklačních cyklů bez výrazného snížení mechanických vlastností. Často stačí polyetylenový odpad namlít na drť, která se dá zpracovávat na běžných vstřikovacích strojích pro nové výrobky. Z fóliového polyetylenového odpadu se většinou vyrobí regranulát, který se používá na technicky méně náročné výrobky. [3]

Polypropylen (PP)

Polypropylen také snáší při recyklaci několik recyklačních cyklů bez výrazného snížení mechanických vlastností stejně jako polyetylen. Zpracovává se podobně jako polyetylen, ale jeho zastoupení v plastových odpadech bývá ve srovnání s polyetylenem několiknásobně nižší. V některých případech se zpracovává čistý polypropylenový regranulát, ale i směsný polyetylenový a polypropylenový regranulát. [3]

Polvinylchlorid (PVC)

V současné době se zhruba 50 % polyvinylchloridového odpadního plastu recykluje na produkty jako jsou trubky, okna, podlahoviny, střešní krytiny a kabely. Odpadní plast z trubek se mele na částice se zrnitostí okolo 5 mm a používá se k výrobě lehčené střední vrstvy nových potrubí. Odpadní plast z oken se drtí a z drtě se odloučí různými procesy kovy, sklo, guma a po transportu vytlačovacím strojem s filtrací se poseká na regranulát. Ten se může použít znovu při výrobě oken nebo také pro výrobu technických výrobků vstřikováním případně vytlačováním. [4]

Polystyren (PS)

Polystyren se snadno recykluje především formou vstřikování, kdy vzniklý recyklát se využívá pro výrobu izolačních a obalových materiálů. Jedná se o tvrdý, křehký a vodojasný polymer (viditelné světlo propouští z 90 %), který má vysoký lesk a je zdravotně nezávadný. Nedoporučuje se pro venkovní použití, jelikož fotooxidací žloutne a křehne. Polystyren lze libovolně barvit a je odolný proti kyselinám, louhům, solím, a i proti alkoholu. Používá se k výrobě nenáročného spotřebního zboží jako jsou například různé kelímky, misky, podnosy a obaly na CD. [5]

Polymetylmetakrylát (PMMA)

V technické praxi je známý jako organické sklo. Mezi jeho vlastnosti patří, že dokonale propouští světlo a velmi dobře odolává povětrnosti a UV záření. Je však náchylnější k poškrábání, jelikož není tak tvrdý. Zároveň je odolný vůči všem běžným chemikáliím, ale je napadán téměř všemi rozpouštědly, mezi které patří aceton a chloroform. Jeho vlastnosti ho předurčují pro optické aplikace jako jsou kryty přístrojů nebo svítidel, k zasklívání verand, ale vyrábějí se z něho i kryty koncových světel automobilů nebo ochranné lišty zadních nárazníků. [6]

Polyetylentereftalát (PET)

Jedná se o typ nejběžnějšího plastu, jelikož je dobře recyklovatelný, a tudíž i velmi žádaný. Mezi jeho vlastnosti patří průhlednost a pevnost. Také nepropustí vlhkost a plyny a je tepelně odolný. Nejčastěji se s ním setkáváme při výrobě nápojových lahví, ale používán je i na technické výlisky zejména při vyztužení skleněnými vlákny, a to ve formě vstřikovaných dílů elektromotorů s dobrou izolační schopností a tuhostí. [6]

2.3 Způsoby organizované recyklace

Výrobní postupy, které jsou určeny ke zpracování polymerního odpadu vedou k vytvoření řetězců postupů, které spolu nemusí místně ani časově souviset. Z tohoto důvodu existují dva základní způsoby recyklace, a to podniková recyklace a mezipodniková recyklace. [7]

2.3.1 Podniková recyklace

Tato forma recyklace se používá v momentě, kdy se odpad využije v tom samém podniku, ve kterém vznikl, a to jako vstupní surovina ve stejném výrobním procesu. Vytváří se tak cyklus, kdy spolu působí několik postupů na zpracování odpadu a kdy jsou odpady vznikající při výrobě opětovně využity. [7]

Podniková recyklace se tak může rozdělit na uzavřený nebo otevřený cyklus, u kterého je důležitá potřeba samostatného organizačního útvaru. [7]

Uzavřený cyklus

Jde o způsob, při kterém se využívá zpracování odpadu ve formě drti za pomoci recyklační jednotky. Recyklační jednotka je umístěna přímo u vstřikovacího stroje a může se skládat z mlýnu nebo drtiče, manipulátoru a dopravního zařízení. Odpad může být využíván, ale i z jiných strojů a v tomto případě je nutné, aby byla zajištěná doprava odpadu do recyklační jednotky. Důležité je tedy uspořádání strojů v halách tak, aby manipulátory případně dopravní zařízení nenarušovaly práci obsluhy strojů a ostatní pracovní činnosti. [7]

Otevřený cyklus

Jde o způsob, při kterém je mlýn nebo drtič na zpracování odpadu umístěný na zvláštním vyhrazeném místě v hale. Někdy je umístěný mlýn nebo drtič i mimo halu, a to z důvodu, že není příliš prostoru umístit ho uvnitř haly. Odpad je v tomto cyklu ukládán do vyhrazených kontejnerů, které jsou umístěné vedle linky, a to buď za pomoci manipulátorů, dopravních pásů nebo obsluhou linky. Po naplnění se kontejnery odvezou k mlýnu nebo drtiči, kde se odpadní materiál následně rozemele. Vzniklá drť se následně vrátí do kontejneru, odkud je dopravována do sušících sil a pak je vhodnými podtlakovými mechanismy nasávána až k vstřikovacímu stroji pro opětovné použití ve výrobě. [7]

2.3.2 Mezipodniková recyklace

Tato forma recyklace představuje systém, do kterého je zapojeno více podniků či institucí, které se zabývají zpracováním a využíváním odpadů. Jde tedy o recyklaci odpadu mimo podnik, ve kterém odpad vznikl. Odpady jsou recyklovány v podnicích, které se recyklací zabývají a následně jsou vráceny buď zpět do podniku ve kterém vznikly pro další použití ve výrobě nebo pro použití v jiném podniku. [7]

V této formě recyklace tak odpadá hledání potřebného prostoru pro recyklační linku, nákup potřebného zařízení a náklady na obsluhu linky. [7]

2.4 Technologie granulace

Technologie granulace je metoda, která se používá pro výrobu granulí. Do tvaru granulí se převádí technologický odpad, a to například vtokové zbytky a zmetky při vstřikování. Granule jsou vhodné pro další zpracování, jelikož mají dobrou sypnou hmotnost, dají se míchat s dalšími materiály například barvivy a dobře se dávkují. Granule mohou mít tvar krychle, čítek, válečků nebo kuliček. [8]

2.4.1 Metody granulace

Výběr metody granulace závisí na vlastnostech zpracovávané taveniny, na prostoru, který je k dispozici pro granulační zařízení, na předpokládaných výkonnostech zařízení a na ekonomických požadavcích.

Existují dvě metody granulace:

Granulace z pásu

Tento způsob granulace je nevhodný pro tvrdé materiály, ale používá se pro polyamid (PA). Jedná se o metodu, která je málo produktivní. Principem této granulace je rozřezání vstupního materiálu na proužky, které jsou rozsekány na granule. [9]

Granulace ze strun

Tento způsob granulace se používá častěji než metoda předchozí. Granulace ze strun se dá provádět dvěma způsoby. Jedním je granulace ze strun za studena, kdy jsou vytlačené struny ochlazeny v kapalině nejčastěji ve vodě a poté jsou rozsekány na granule. Granule se poté musí sušit, jelikož dochází ke styku plastu s kapalinou. Nevýhodou granulace ze strun za studena je velké množství strun, které se mohou slepovat, trhat nebo lámat. Tento

typ granulace se používá nejčastěji u akrylonitrilbutadienstyrenu (ABS). Druhým způsobem je granulace ze strun za tepla, kdy jsou granule odřezávány z čela granulační hlavy, která má mnoho otvorů. Odřezávání granulí probíhá za účinku vody nebo s následným chlazením vodní mlhou. Tento typ granulace se používá u polypropylenu (PP). [9]

2.5 Druhy recyklace

Recyklace odpadu nepatří mezi jednoduchý proces. Materiál za dobu používání prošel mnoha změnami a mohl být ovlivněn spousty vnějších faktorů mezi které lze zařadit teplo, světlo a mechanické zatížení. Zároveň také mohlo dojít ke kontaminaci materiálu různými nečistotami. Z tohoto důvodu existuje více druhů recyklací. Patří mezi ně materiálová recyklace, chemická recyklace, energetická recyklace a surovinová recyklace.

2.5.1 Materiálová recyklace

Materiálová recyklace je nejvýhodnější recyklací pro termoplasty a považuje se za jednu z nejnáročnějších recyklací z důvodu velkého množství procesů. Mezi nejjednodušší proces se zahrnuje mletí plastových výrobků a jejich tepelné mechanické zpracování rozemletých částí. Naopak mezi nejtěžší postup se zahrnuje kompatibilizační postup, který slouží k přípravě vícesložkových materiálů ze směsí odpadních plastů. [10]

Tento typ recyklace je založen na dodávce tepelné a mechanické energie a aditiv mezi které patří stabilizátory, barviva a plniva. Následně pak dochází k přetvoření odpadního materiálu na nový materiál s mechanickými a estetickými vlastnostmi blízkými výchozímu polymeru. [10]

Materiálová recyklace se rozděluje na:

Primární

Recykluje neznečištěný technologický odpad. Výsledný produkt má vlastnosti, které jsou blízké původnímu polymeru a lze ho využít v původním procesu. [10]

Sekundární

Recykluje různorodý a znečištěný odpad. Výsledný produkt se liší od původního polymeru a používá se v méně náročných procesech. [10]

Regranulace – výroba regranulátu

Regranulace je tepelné zpracování plastového odpadu, kdy její výstupní surovinou pro další výrobu je tzv. regranulát. Touto formou se dají zpracovávat běžné druhy plastů jakou jsou polypropylen (PP), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polykarbonát/akrylonitril – butadien – styren (PC/ABS), polymetylmetakrylát (PMMA), polystyren (PS) či polykarbonát (PC). [11]

Pro výrobu regranulátu se používá regranulační linka. Na této lince se nejdříve plastový odpad rozemele na malé kousky. Následně je pomocí pásového dopravníku přesune k magnetizačnímu indikátoru kovů. Tento magnetizační indikátor odstraní z plastového odpadu veškeré kovy, které by se v něm mohli nacházet. Odpad je pak šnekově tlačěn do mixéru, kde se ještě rozemele na velmi malé kousky. Poté je vytlačen z mixéru a nastává tepelný proces během kterého se dají přidávat různá barviva a stabilizátory pro zlepšení vlastností. Dalším krokem je odplynění, aby v materiálu nevznikly vzduchové bubliny. Takto upravený materiál, pak projde přes filtr taveniny a dojde ke zchlazení. Konečným krokem je odstředění vody a sušení. Vyrobený regranulát je pak dopraven do zásobního sila, kde je mícháním homogenizován a plněn do pytlů nebo vaků. [11]

Dobrá kvalita regranulátu závisí na čistotě, správném nastavení technických podmínek a snížení vlhkosti při jednotlivých operacích regranulace. [11]

Regranulát patří mezi koncový produkt recyklace plastů a je možné garantovat že má nejvíce vlastností přepracovaného odpadu jako druhotná surovina. [11]

Regranulace může být prováděna dvěma způsoby:

Mokrý regranulace

Používá se při zpracování sběrového nízkohustotního polyethylenu s praním. [12]

Suchá regranulace

Používání se při zpracování čistých technologických odpadů na bázi polypropylenu nebo kombinací polypropylenu s nízkohustotním polyetylenem (LDPE) bez praní. [12]

Aglomerace

Aglomerace je druh tepelného zpracování, konkrétně spečení rozdrcených a semletých kousků plastového materiálu do formy granulí. Aglomeráty jsou používány především jako surovina pro výrobu regranulátu, ale využívají se i při zpracování technologiemi vytlačování nebo vyfukování. [11]

Technologie vytlačování

Jedná se o technologickou operaci, při které je tavenina plastu kontinuálně vytlačována přes vytlačovací hlavu do volného prostoru. Tato technologie slouží k výrobě konečných tvarů nebo k výrobě polotovarů. Pro tuto technologii se používá šnekový vytlačovací stroj, který je součástí výrobních linek. [13]

Technologie vyfukování

Jedná se o postup, při kterém je polotovar tvarován ve vyfukovací formě přetlakem vzduchu do tvaru uzavřeného tělesa. Polotovarem může být předlisek vyráběný vstřikováním nebo vytlačováním. Touto technologií se zpracovávají hlavně polyetylen (PE) a polypropylen (PP). [13]

Tabulka 1 Rozdíly mezi technologií vstřikování a vyfukování

Technologie	Jednotka	Vstřikování	Vyfukování
Parametry nástroje	Tlak	Vysoký	nízký
	Teplota	Vysoká	Nízká
	Uzavírací síla	Vysoká	Nízká
Plast	Molekulová hmotnost	Nízká	Vysoká
	MFI	Vysoký	Nízký
Výrobek	Namáhání nástroje	Vysoké	Nízké
	Smrštění	Vysoké	Nízké
	Lesk povrchu	Vysoký	Nízký
	Přesnost rozměrů	Vysoká	Nízká
Nástroj	Cena	Vysoká	Nízká
	Doba	Dlouhá	Krátká
Typ výrobku		Precizní	Funkční

Drcení a mletí

Jedná se o mechanické zpracování plastového odpadu. Patří mezi podobný proces jako je regranulace a aglomerace. [13]

Jedním ze vstupního materiálu pro tuto technologii je špinavý netříděný plastový odpad, kdy nadrcený materiál může být pouze možnost, jak zmenšit objem odpadu. Druhým ze vstupního materiálu jsou čisté odřezky z výroby, kdy po drcení je možné tento materiál použít na novou výrobu. Vzniklá drť se chemicky nebo tepelně přepracuje a musí se k ní přidat surový materiál, aby tak vznikl plnohodnotný materiál s kvalitními vlastnostmi. [13]

Pro tuto technologii zpracování plastového odpadu se používají stroje jako jsou mlýny a drtiče. [13]

Mlýny

Mlýny jsou určeny pro jemné mletí plastového odpadu na částice o velikosti 0,5 až 0,1 mm, kdy ke zmenšování dochází tlakem, smykem nebo řezem. Existuje několik typů mlýnů:

- *Nožový mlýn*

Jedná se o nejpoužívanější mlýn na mletí recyklovaného plastového odpadu. Tento mlýn má více nožů, které jsou pevně uloženy kolem rotoru a ten nese další nože viz. obrázek č. 2. [13]

Materiál se nejdříve nasype do násypky a pak přichází do komory, kde jsou nože. Jak se rotor rychle otáčí, dochází k tomu, že nože rozsekají odpadní materiál na malé částice. Během mletí dochází vlivem tření ke zvyšování teploty uvnitř mlýnu, a to má za následek, že je materiál povrchově natavován. Když dojde k dosažení určité teploty je za stálého mletí do mlýnu vstřikováváno předem určené množství vody. Musí být však spuštěn i odsávací ventilátor. Ten slouží k odsávání vznikající páry, a i k odvodu vznikajících škodlivých par, které mohou unikat při natavování materiálu. Následně oky síta propadává materiál. Velikost síta se dá měnit a může se tak získat požadovaná velikost částic. Materiál, který nepropadne sítím je dále mlet noži a vrací se tak do procesu mletí. Tímto způsobem je zaručené, že se každý materiál po čase rozmělní na požadovanou velikost. Aby docházelo k rychlejšímu propadávání a nezanesení síta, tak je síto napojeno na vibrační mechanismus, který

chvěje sítím a dochází tak k rychlejšímu propadávání částic. Pak následuje prudké ochlazení a částice materiálu se tak shromáždí a jsou vypuštěny z mlýnu. [13]

Na nožovém mlýnu se nejčastěji zpracovává odpad jako PVC, PE a PP. Tento typ mlýnu se vyrábí s různými výkony a jeho měrná spotřeba energie se pohybuje mezi 600 až 300 Wh.kg⁻¹. [13]

Mezi výhody tohoto typu mlýnu patří rychlost drcení, natavování materiálu, snadno se čistí a jemnost mletí lze regulovat výměnou síta. Mezi nevýhody patří možné zanesení síta při nastavení malé velikosti, také zanesení síta při větším natavení materiálu, velká potřeba údržby a cena. [13]

Nejvíce používané nožové mlýny v průmyslové výrobě jsou od výrobců:

Rapid Granulator AB

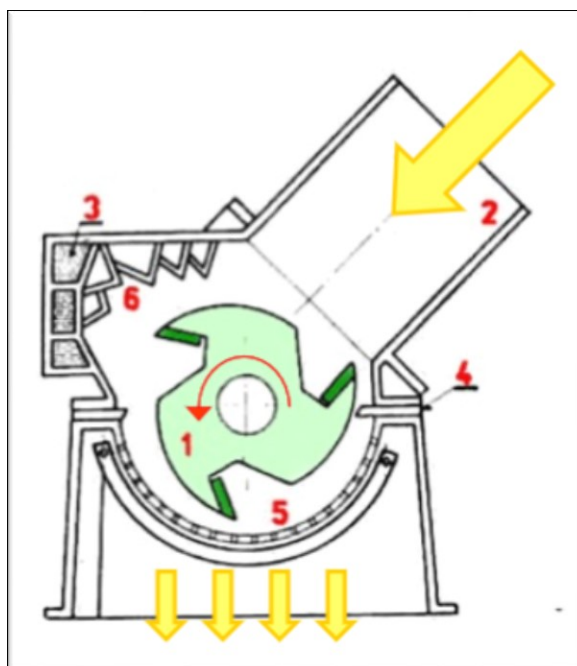
Společnost Rapid Granulator AB patří mezi světového leadera v oblasti granulace. Vyrábí, vyvíjí a prodává jednotlivé mlýny, které má ve své nabídce a nabízí integrované řešení recyklace pro průmysl zpracování plastů, a to v továrnách ve Švédsku a na mezinárodní úrovni. [32]

Wanner Technik GmbH

Společnost Wanner Technik GmbH nabízí praktické a trvanlivé řešení pro téměř všechny problémy, které vznikají při recyklaci vtoků a vadných dílů a které tak mohou vzniknout při výrobě vstřikovaných, vyfukovaných nebo vytlačovaných termoplastických dílů. Tato společnost dále navrhuje a vyrábí nejmodernější plastové granulátory v Německu. [33]

Moretto SpA

Společnost Moretto SpA získala od svého založení vedoucí postavení na trhu mezi výrobci automatizovaných systémů pro zpracování plastů. Mezi vize této společnosti patří snaha řídit technologické inovace, které kombinují prvotřídní produkty a zlepšují procesy pro zpracování plastů. Mezi hlavní kompetence patří dopravování, sušení, dávkování, míchání, broušení, chlazení a regulace tepla pro zpracování plastových dílů. [34]



Obrázek 2 Nožový mlýn [42]

Legenda:

1 rotor s noži;

2 násypka na předrcený odpad;

3 chlazení;

4 statický protinůž;

5 síto

- *Talířový nárazový mlýn*

Tento typ mlýnu, který je znázorněn na obrázku č. 3 se používá stále více a umožňuje rozemlít materiál na rovnoměrnou zrnitost 100 mm. Vstupní materiál musí být již přede mletý a pro přede letí se používá nejčastěji nožový mlýn. [13]

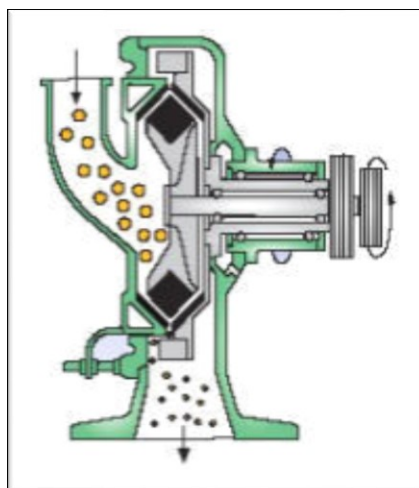
Materiál se nejdříve vžene pomocí gravitace a menšího sání do komory, kde dochází ke kontaktu s rotující vrtulí. Vrtule vrhá materiál proti bočnicím, které jsou rýhované. Přičemž jedna z bočnic je poháněná motorem v protisměru, než se otáčí vrtule. Dochází tak k tomu, že se materiál vlivem namáhání rozpadá, trhá a mele na menší částice. Částice pak postupně dosahují potřebné velikosti štěrbin mezi bočnicemi. Velikost částic se dá regulovat během procesu mletí, aniž by se musel zastavit mlýn. Tím, že v mlýnu dochází k vysokému turbulentnímu proudění je nutné ho zchladit.

Štěrbiny jsou používány z důvodu, že se nemusí měnit, nezanáší se a získá se tak materiál o menší velikosti. Materiál, který je rozemletý skrze štěrby pak putuje k výstupnímu otvoru mlýnu. [13]

Talířový nárazový mlýn potřebuje údržbu na odstranění usazenin ve šterbinách a odstranění zbytkových shromážděných částic ve výstupním otvoru. Údržba však nemusí být tak častá, pokud dochází k dostatečnému chlazení mlýnu. [13]

Mezi výhody tohoto typu mlýnu patří mletí na velmi malé částice, nastavitelná velikost šterbin a to, že používá šterbiny, na kterých se neusazuje materiál. Mezi nevýhody patří chlazení a potřebu již přede mletého materiálu z předchozího mlýnu. [13]

Známý výrobce talířového nárazového mlýna je společnost Pallmann Industries, Inc. Tato společnost patří mezi významného výrobce talířového nárazového mlýna s celosvětovou působností. Specializuje se na techniku snižování velikosti plastů v recyklačním průmyslu. Její sídlo je v německém městě Zweibrücken, kde provozuje své výzkumné a technologické centrum. [35]



Obrázek 3 Talířový nárazový mlýn [43]

Drtiče

Při mletí odpadu v drtičích se využívají nože ve tvaru kladiva. Ty jsou zavěšeny na rotoru a díky funkci změny otáčení rotoru se zamezuje a ochraňuje jednostrannému opotřebení kladiv. Vliv změny otáčení rotoru prodlužuje životnost kladiv a kladiva se i samo obnovují. To znamená, když se poničí jedna strana kladiva otočí se směr rotace a postupně se poškozují druhá strana. [14]

Materiál vstupuje do drtiče hrdlem přes závěs, který se otevírá jen dovnitř. Pak se materiál drží v mlecím prostoru, dokud neprojde mřížkou. Mřížka je umístěna ve spodní části a je vyměnitelná z důvodu, že určuje velikost mletých částic. Rozemletý materiál se pak obvykle odsává do cyklonu. [14]

Drtiče se využívají pro drcení a mletí křehkých materiálů mezi které patří PVC, PP a ABS. Vyrábějí se v různých velikostech a s různými výkony. Provoz drtičů bývá velmi hlučný a vyžaduje tak oddělené prostory. [14]

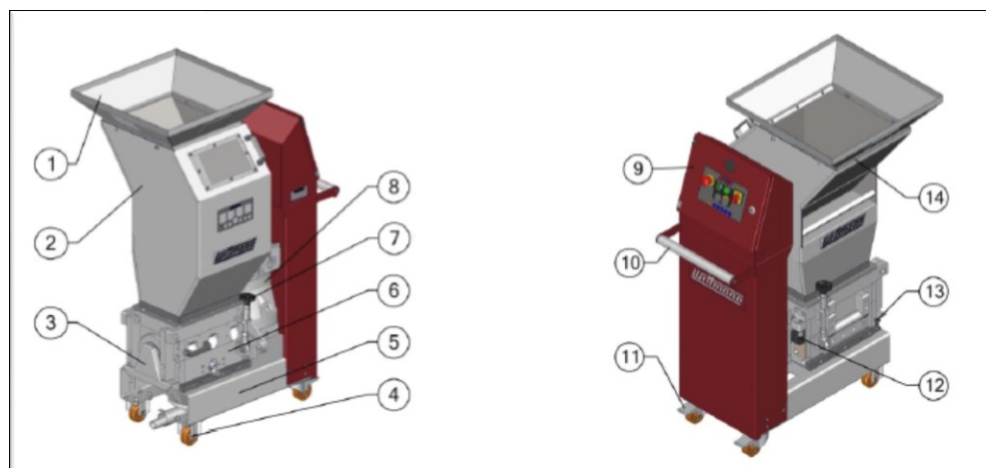
Mezi výhody drtiče patří snadná údržba a funkce, že umí rozemlít i tvrdé materiály na malé částice. Mezi nevýhody lze zařadit pořizovací cenu a plast se může někdy na kladiva navíjet. [14]

- *Bezsítový drtič*

Jde o často používaný drtič, který je určený k mletí odpadu vzniklého ze vstřikování plastických hmot. Mezi jeho funkce patří provádět jednotné a důkladné zmenšení velikosti umělohmotného odpadu jakou jsou vtokové zbytky a vtoky vadných dílů. [15]

Výrobce tohoto bezsítového drtiče a řezací komory je společnost Wittmann Battenfeld CZ spol. s.r.o. Tato společnost nabízí ucelený výrobní program periférií a drtičů na zpracování plastů. Mezi uživatele drtičů patří především výrobci technických plastových dílů, které jsou orientováni na automobilový průmysl. V současné době se drtiče využívají ve více než 200 lisovnách plastů v České a Slovenské republice. [40]

Schéma bezsítového drtiče je znázorněno na obrázku číslo 4. [15]



Obrázek 4 Schéma bezsítového drtiče [44]

Legenda:

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1 trychtýř; | 8 převodový motor; |
| 2 plnicí násypka; | 9 ovládací panel; |
| 3 zásobník s výstupním potrubím; | 10 rukojeť; |
| 4 pevná kolečka; | 11 otočná kolečka s brzdou; |
| 5 rám; | 12 bezpečnostní vypínač pro násypku |
| 6 řezací komora; | 13 uvolnění zásobníku |
| 7 kulová klika pro otevření řezací komory; | 14 přepážka proti zpětnému pohybu |

➤ *Plnicí násypka*

Je konstruována tak, aby se nemohla pohybovat. Jedná se o vertikální pouzdro se zvukovou izolací s otočným připojením k řezací komoře.

➤ *Zásobník*

Je určený pro mletý materiál, který propadne z řezací komory. Je vybaven výstupním potrubím.

➤ *Řezací komora*

Jedná se o skříň pravoúhlého tvaru. Skládá se z hlavního rámu, válců, hřebenů a lámacího nože.

➤ *Převodový motor*

Jedná se o motor, který je poháněn převodovkou.

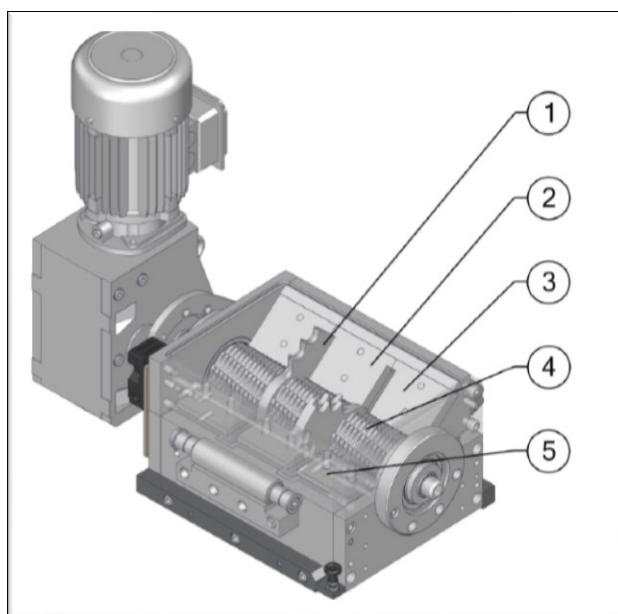
➤ *Bezpečnostní vypínač*

Slouží pro kontrolu uzavření násypky a zásobníku a zamezuje spuštění drtiče.

Popis funkcí bezsítového drtiče

Bezsítový drtič je určený k tomu, aby se společně používal s lisem a je vybavený válci, které zpracovávají umělohmotný odpad. Zároveň se v bezsítovém drtiči nesmí používat materiál jako jsou těžké a tvrdé předměty, kovové částice, sklo a papír a musí být umístěný v oblasti, kde nehrozí nebezpečí výbuchu. [15]

Odpad, který musí být zbavený nečistot a kovů se vkládá do násypky drtiče ručně, robotem nebo dopravním pásem. Dále odpad propadá do řezací komory viz. obrázek č. 5, kde je řezání prováděno pomocí válce a lámacího nože, který pomocí hřebenů rozřeže odpad na granulát. Velikost granulátu se určuje výškou zubů. Granulát, který je rozřezán pomocí hřebenů následně působením gravitační síly propadá do zásobníku odkud postupuje do výstupního potrubí a tím se přepraví dále do odsávacího zařízení. Odsávací zařízení přepraví granulát k opětovnému použití do výrobního stroje nebo ho dopraví do zásobníku pro pozdější použití. Bezsítový drtič se snadno čistí a je konstruován tak aby přístup k čištění od barev a umělých hmot byl snadný a rychlý a aby spolehlivě vytvořil čistý granulát s minimálním množstvím jemného materiálu a velkých kusů. [15]



Obrázek 5 Složení řezací komory [44]

Legenda:

*1 nůž;
2 středový hřeben;
3 boční hřeben;*

*4 válec;
5 stírač*

2.5.2 Chemická recyklace

Materiálová recyklace není vhodná pro všechny druhy vstupní suroviny, a to z důvodu, že jsou některé polymery zvlášť náchylné k degradaci při opakovaném zpracování. To zároveň komplikuje samotné technologické provedení recyklace a významně to zhoršuje kvalitu recyklátu. Další komplikací materiálové recyklace je požadavek na poměrně vysokou čistotu vstupní suroviny a v takových případech je východiskem právě chemická recyklace. [10]

Chemická recyklace je založena na chemickém rozkladu polymeru na produkty o podstatně nižší molární hmotnosti, oligomery (4 – 15 monomerních jednotek), popřípadě až na monomery samotné a další chemické zpracování takto získané suroviny. Jedná se tedy o chemický rozklad plastového odpadu na jednoduché složky, z nichž se chemicky vyrobí nový materiál či výrobek. [10]

Mezi výhodu chemické recyklace patří nízké nároky na čistotu vstupní suroviny a mezi nevýhody patří vysoké investiční náklady na technologické zařízení a praktická uskutečnitelnost jen v podmínkách chemického průmyslu ve spojení s již existujícími procesy. [10]

Tepelná depolymerace

Jedná se o nejjednodušší případ chemické recyklace. Tepelná depolymerace je chemická reakce, kdy dochází ke štěpení polymerů na monomery působením tepla od 500 do 800 °C nebo tepla a kondenzátorů bez přístupu kyslíku. Výtěžnost monomeru z polymeru je závislá na druhu polymeru, což ukazuje tabulka číslo 2. [16]

Výhodou tepelné depolymerace je možnost znovu využít znečištěný polymerní odpad a zároveň nově vyrobený produkt je velmi kvalitní a má srovnatelné vlastnosti s původním materiálem. [16]

Nevýhodou tepelné depolymerace je komplikovaný, náročný a drahý proces a tím, že se jedná o chemický proces, při kterém jsou používány různé chemické látky, tak je potřeba provést zabezpečení, aby neunikali a zachovalo se tak ekologicky přijatelné prostředí.

Existují tři techniky depolymerace. Depolymerace pomocí hydrolýzy, která se používá nejčastěji dále depolymerace pomocí methanolýzy a glykolýzy. [16]

Tabulka 2 Výtěžnost monomeru z polymeru

Polymer	Výtěžek monomeru (%)
PTFE	97–100
PS	42
PIB	32
PP	0,2-2
PE	Méně než 1

Legenda: PTFE – polytetrafluoretylen; PS – polystyren; PIB – polyisobutylen; PP – polypropylen; PE – polyetylen

- *Hydrolýza*

Depolymerace pomocí hydrolýzy poskytuje kyselinu tereftalovou (TPA) a etylenglykol (EG) a kromě toho se v průběhu tvoří také velké množství soli, kterou je potřeba odstranit a s tím souvisí vynaložení dalších nákladů. [16]

Hydrolýza představuje rozklad polymerů ve vodném prostředí za vyšších teplot a tlaků. Používá se pro skupiny plastů připravených polykondenzačními a polymeračními reakcemi jako jsou například polyamidy, polyuretany, polykarbonáty a polyestery. [16]

- *Methanolýza*

Depolymerace pomocí methanolýzy poskytuje dimethyltereftalát (DMT) a etylenglykol (EG). [16]

Methanolýza je velmi podobná hydrolýze jen se při rozkladu polymerů místo vodního prostředí používá metan. Zároveň je technicky vyspělejší než hydrolýza a vyžaduje tak vyšší investice a vyšší provozní náklady. [16]

- *Glykolýza*

Depolymerace pomocí glykolýzy poskytuje Bis-(2-hydroxyethyl) tereftalát (BHET) nebo polyesterové polyoly (APP). [16]

Glykolýza má nízké technické nároky a vysoký energetický obsah výsledných produktů, a to vede k tomu, že je ekonomicky výhodnější než předešlé dvě techniky. [16]

Solvolýza

Solvolýza spočívá ve zkapalnění polymerů za pomoci solventů, takzvaných rozpouštědel, kde produkt tvoří monomery ve formě nasycených uhlovodíků, což je v podstatě lehká nasycená ropa. U tohoto procesu recyklace se jako rozpouštědla používají různé alkoholy jako je metan a glykol a také voda. [16]

Podstatou solvolytického rozkladu je obrácení vratné polykondenzační reakce směrem k odbourávání monomerních jednotek z řetězců polymeru. [16]

Způsobem solvolýzy lze recyklovat materiály jako jsou polyamidy (PA), polyuretany (PUR), polyetylentereftalát (PET) a polybutylentereftalát (PBTP). [16]

2.5.3 Energetická recyklace

Energetická recyklace představuje po ekologické stránce akceptovanou metodu spalování plastového odpadu ve speciálních spalovnách s následným využitím získané energie. [1]

Energetická recyklace je vhodná jak pro malé plastové obaly, tak i pro znečištěné plastové obaly a v neposlední řadě pro těžko zpracovatelný plastový odpad, který může zatěžovat skládky. [1]

Výhody energetické recyklace jsou:

- snížení hmotnosti odpadu a škodlivých látek
- možnost zhodnocení kontaminovaného a silně znečištěného plastového odpadu
- možnost efektivního zhodnocení odpadu, který není možné využít materiálovou nebo surovinovou recyklací [1]

Mezi metody energetické recyklace patří spalování.

- *Spalování*

Spalování lze zařadit mezi účinný a environmentálně přijatelný způsob pro zpracování odpadu. Jedná se o chemický proces a nejjednodušší metodu, která přeměňuje organická paliva za přístupu kyslíku na tepelnou energii. Tepelná energie, která se získá spalováním je pak využívána pro technologické procesy nebo pro výrobu elektrické energie. [1]

Cílem spalování odpadu je snížit množství organických škodlivých látek v prostředí a omezit tak celkovému množství odpadu. [1]

Co se týká polymerního odpadu, tak je prakticky všečen spalitelný a má poměrně vysokou výhřevnost. Spaluje se při teplotách okolo 900 °C a spaliny se před vypuštěním do ovzduší musí vyčistit. [1]

Tabulka 3 Výhřevnost polymerního odpadu

Název odpadu	Výhřevnost (MJ/kg)
PET	23
PVC	18 – 26
PA	30
PE	43
PP	44
PS	44

Legenda: PET – polyetylentereftalát; PVC – polvinylchlorid; PA – polyamid; PE – polyetylen; PP – polypropylen; PS – polystyren

2.5.4 Surovinová recyklace

Surovinová recyklace se používá na silně znečištěné směsi různorodých plastových složek. Principem surovinové recyklace jsou termicky destrukční procesy, které rozkládají polymerní složky vstupní suroviny na směs plyných a kapalných uhlovodíků. [17]

Mezi hlavní přednost surovinové recyklace patří nízké nároky na kvalitu vstupního polymeru a také široká využitelnost vzniklého syntetického plynu v chemickém průmyslu.

Výstupními produkty surovinové recyklace jsou energeticky využitelný plyn a směs kapalných uhlovodíků využitelných jako topné oleje nebo jako petrochemická surovina.

Mezi metody surovinové recyklace patří pyrolýza a zplyňování. [17]

- *Pyrolýza*

Pyrolýza se považuje za velmi perspektivní technologii pro likvidaci odpadu. Jedná se o proces, který se využívá pro vývoj nových technologií a který je založen na rozkladu organických látek působením tepla bez přístupu kyslíku. Rozdělení dle působnosti tepla znázorňuje tabulka číslo 4. [18]

Podstatou pyrolýzy je rozštěpení makromolekulárních látek na malé molekuly, tak aby se zachovala vazba mezi uhlíkem a vodíkem. Jedná se tedy o ohřev materiálu nad maximum organických sloučenin, což vede k jejich štěpení až na stále nízkomolekulární produkty a tuhý zbytek. [18]

Mezi výsledné produkty pyrolýzy patří například vodík, plynná báze metanu a kapalná báze motorové nafty. [18]

Tabulka 4 Rozdělení pyrolýzy dle působnosti tepla

Název procesu pyrolýzy	Teplota
nízkoteplotní	pod 500 °C
středněteplotní	500 – 800 °C
vysokoteplotní	nad 800 °C

- *Zplyňování*

Zplyňování patří mezi moderní technologii, ve které dochází k přeměně uhlíkatých materiálů za teploty nad 800 °C na pevné nebo kapalné skupenství za účelem získání energie. [19]

V tomto procesu dochází k přeměně odpadního plastu na tepelnou a elektrickou energii a zároveň u zplyňování dochází k menší produkci plynných produktů než u procesu spalování. To má za následek čištění menšího množství spalin a tím pádem i nižší investiční provozní náklady na zpracování odpadu. [19]

2. 6 Využití recyklátu v technologii vstřikování

Technologie vstřikování má mezi zpracovatelskými plastikářskými technologiemi velký význam. Jedná se o nejrozšířenější způsob výroby, kde výrobky vyrobené touto technologií mají dobrou rozměrovou i tvarovou přesnost a vysoké mechanické a fyzikální vlastnosti. Technologií vstřikování je možné zpracovávat jak termoplasty, tak i reaktoplasty a kaučukové směsi. [17]

2.6.1 Historie vstřikování

Počátek historie vstřikování je spojováno se jménem John Wesley Hyatt, který spolu se svým bratrem v roce 1870 v USA patentoval materiál ze kterého později vznikl celuloid, včetně zařízení pro jeho vstřikování. [3]

Vstřikování plastů se jako výrobní obor začal rozvíjet po 1. světové válce. V roce 1921 se v Německu jako první na světě vyvíjí pístový ruční vertikální vstřikovací stroj. O jeho vývoj se zaslouží A. Eichengrün a H. Bucholtz. Ve stejném roce je v USA založena firma B + B Metal Works, která vyrábí formy pro vstřikování a zabývá se i obchodem s nimi. V roce 1926 německá firma Eckert und Ziegler nabízí první horizontální ruční vstřikovací

stroj s formou na pohyblivých upínacích deskách. V roce 1929 zahajuje výrobu pístových vstřikovacích strojů firma Ing. Vltavský v Rakovníku. V roce 1930 firma Ford Motor Co. začíná montovat výrobky z plastů do svých osobních automobilů. V roce 1932 je patentován elektricky vyhřívaný plastikační válec. V roce 1933 je vyvinut hydraulicky poháněný uzavírací systém. V roce 1936 se v USA zavádějí do vstřikovacích strojů časové ovladače. V roce 1943 firma Basf patentuje plastikační šnek s vratným pohybem. V roce 1956 je patentována šneková vstřikovací jednotka. V roce 1968 se objevují vstřikovací stroje s plně elektronickým řízením. V roce 1979 je poprvé nasazen na nepohyblivou upínací desku vstřikovacího stroje robot. V roce 1985 je předveden první systém, který využívá 3 D matematické modelování a také je představen první plně elektrický vstřikovací stroj. V roce 1987 firma Engel začíná vyrábět bezsloupové horizontální vstřikovací stroje. V roce 1988 je zaváděn kontrolní systém procesu vstřikování. V roce 1992 se objevují dvou deskové vstřikovací stroje a v roce 1998 je zahájen vývoj řídicího systému. [3]

2.6.2 Technologie vstřikování

Technologie vstřikování je nejrozšířenější způsob výroby požadovaných dílů z plastů. Tato technologie se vyznačuje složitým fyzikální procesem, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj a vstřikovací forma. [17]

Polymer

Polymer je z chemického hlediska organická látka přírodního nebo syntetického původu. Patří k nejmladším konstrukčním materiálům a stále více se prosazuje a uplatňuje v průmyslovém odvětví. [6]

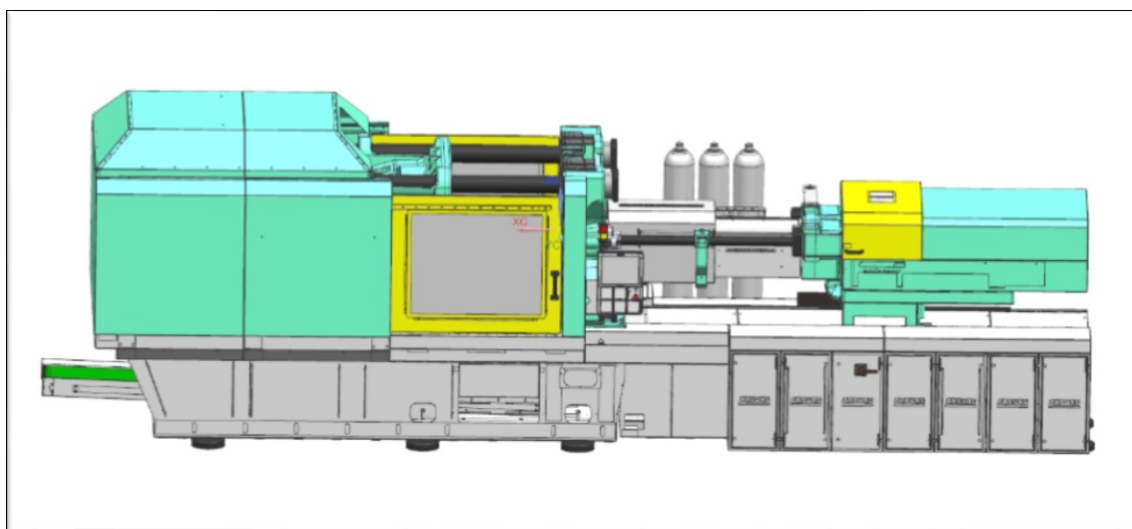
Mezi výhody polymerů patří snadná zpracovatelnost, nízká hustota, dobrá elektroizolační vlastnost, odolnost proti povětrnosti a korozi. U některých polymerů je výhodou i průhlednost. [6]

Mezi nevýhody polymerů patří nízká teplotní odolnost, změna mechanických vlastností s teplotou, větší teplotní roztažnost a vytváření elektrostatického náboje. [6]

Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj patří mezi hlavní součást procesu vstřikování viz. obrázek č. 6. V současné době existuje velký počet různých konstrukcí vstřikovacích strojů, které se od sebe liší různými vlastnostmi. Například svým provedením, stupněm řízením, stálostí a reprodukovatelností jednotlivých parametrů, rychlostí výroby, snadnou obsluhou i cenou. Na vstřikovacím stroji lze vyrobit i výrobky velmi složitých tvarů a v obrovských sériích. Vstřikovací stroj je primárně určený pro zpracování polymerních materiálů, a to nejvíce v podobě granulí. Polymery a směsi mohou být dodávány do vstřikovacího stroje i ve formě prášku. [5]

Známý výrobce vstřikovacích strojů je společnost Arburg spol. s r.o. Tato společnost patří mezi světového výrobce kvalitních vstřikovacích strojů pro zpracování plastů. Byla založena jako rodinný podnik v roce 1923 v Loßburgu ve Schwarzwald. [39]



Obrázek 6 Vstřikovací stroj [45]

Vstřikovací stroj se skládá ze vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky a z ovládání a řízení vstřikovacího stroje. [20]

Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka slouží k přípravě a dopravě roztaveného materiálu do formy. Mezi nejrozšířenější typ patří vstřikovací jednotka se šnekem. Tato jednotka nejdříve dopraví připravený materiál z násypky pohybem šneku do tavicí komory, kde materiál taje. Roztavený materiál se následně hromadí před čelem šneku, který v průběhu otáčení ustupuje dozadu. Po nahromadění materiálu se šnek zastaví a následně vstřikuje roztavený

materiál do formy. K přednostem této vstřikovací jednotky můžeme zařadit jednoduché dávkování, možnost dodatečně barvit hmotu nebo přidávat další přísady. [13]

Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka slouží k ovládání pohybu vstřikovací formy. Hlavní části uzavírací jednotky jsou uzavírací systém, vodící tyče, upínací desky a vyhazovací systém. Uzavírací jednotka slouží k upnutí formy na upínací desky, zajišťuje plynulé pohyby formy a vytlačuje případně vyhazuje výrobek z formy. Podle způsobu provedení v současné době existují hydraulické, hydraulicko – mechanické, elektrické a elektro – mechanické uzavírací jednotky. [13]

Ovládání a řízení vstřikovacího stroje

Jedná se o důležitou součást vstřikovacího stroje. Správné ovládání a řízení vstřikovacího stroje zaručí přesnost a kvalitu vstřikovaného materiálu. [21]

Pro ovládání a řízení se používá regulátor, což je kontrolní a řídicí jednotka. Tato jednotka zpracovává aktuální hodnoty sledovaných parametrů, které získá přímo ze systémů stroje a porovná je se zadanými hodnotami. V případě, že regulátor zjistí nějakou odchylku je schopen ji v daném systému dorovnat na správnou hodnotu. [21]

Mezi ovládání a řízení vstřikovacího stroje patří i signalizační zařízení, které informuje o právě probíhajících funkcích, případné poruše. [21]

Vstřikovací forma

Vstřikovací forma je nástroj, který není pevnou součástí vstřikovacího stroje, ale pouze se na něj upíná. Jedná se tedy o výměnné zařízení vstřikovacího stroje. Na vstřikovacím stroji lze používat více vstřikovacích forem podobného typu, velikosti a hmotnosti. [17]

Vstřikovací forma má funkci takovou, že v průběhu vstřikovacího cyklu je naplněna roztaveným plastem, kdy je následně po zchladnutí zhotoven výstřik s požadovaným tvarem a funkčními vlastnostmi. [17]

V dnešní době používané vstřikovací formy jsou technicky poměrně značně komplikovaná zařízení, na které se kladou nemalé nároky z hlediska kvality, produktivity, spolehlivosti a automatické výroby. Musí tedy během své životnosti splňovat určité požadavky mezi které patří odolnost vůči vysokým tlakům, zajištění požadovaného rozměru a kvality výstřiku, snadné vyjmutí výstřiku, snadnou obsluhu a automatický

provoz, nízkou pořizovací cenu, snadnou a rychlou výrobu a vysoké využití zpracovávaného plastu. [17]

Hlavní části vstřikovací formy

- *Kotevní desky*

Slouží k upnutí formy do vstřikovacího stroje. Kotevní deska se dělí na pevnou a pohyblivou. Pevná kotevní deska je upnuta na pevnou část vstřikovacího stroje a také je na této desce upevněna podkladová deska s vodícími sloupky a tvarová deska s vyrobenými kontaktními tvary – tvárnice. Pohyblivá kotevní deska je upnuta na pohyblivé části vstřikovacího stroje a uprostřed této pohyblivé kotevní desky je otvor, kterým prochází mechanismus obsluhy vyhazovačů. [17]

- *Tvarové desky*

V těchto deskách jsou vyrobeny kontaktní tvary, do kterých je v hotové formě vstřikován roztavený plast. Tvarové desky se dělí na pevné a pohyblivé. Pevnou tvarovou desku, kterou prochází vtok a pohyblivou tvarovou desku, kterou prochází vyhazovače. [17]

- *Desky vyhazovačů a vyhazovače*

Vyhazovače jsou nezbytnou součástí formy a jsou upevněny do desek vyhazovačů. Mohou mít různé tvary, délky a průměry. Prostřednictvím vyhazovačů dochází k vyhození výrobku z formy a jsou součástí pohyblivé části formy. Pokud je forma složitá a speciální, tak mohou být vyhazovače upevněné i v pevné části formy. [17]

- *Vodící sloupky a pouzdra*

Vodící sloupky a pouzdra jsou základním stavebním kamenem formy a jejich prostřednictvím dochází k zajištění spolehlivého vedení protilehlých částí formy. Při otevírání a zavírání se vodící kolíky pohybují v otvorech pohyblivých vložek. Při otevírání a zavírání formy vodící sloupky zapadají do příslušných otvorů a pohyblivé vložky přisunou zpět k jádru formy. [17]

- *Systém chlazení a temperace*

Vstřikovací forma musí pracovat v optimálních teplotních podmínkách. Je velmi důležité vstřikovací formy na začátku procesu vstřikování, kdy ještě nejsou zahřátý na pracovní teplotu temperovat. V případě, že je dosažena pracovní teplota je nutné vstřikovací formu zase zchladit. Vstřikovací forma se může chladit i temperovat vodou nebo olejem. [17]

Vedlejší části vstřikovací formy

- *Vtoková soustava*

Jedná se o systém rozváděcích kanálů, které spojují ústí vtoku s tvarovými dutinami formy. Úkolem vtokové soustavy je naplnění tvarových dutin taveninou, a to v co nejkratším čase a s nejmenšími odpory. Na vtokové soustavě záleží kvalita výlisků. Vtoková soustava se rozděluje na dvě základní skupiny. První skupinou je studená vtoková soustava, která se používá u forem pro malé série výlisků. Druhou skupinou je vyhřívaná vtoková soustava, která se používá u forem na velké série výlisků. [17]

- *Systémy pro vytáčení výlisků nebo jádra*

Tyto systémy se používají u konstrukcí forem na výlisky se závity a do jedné formy se tak umísťuje co nejvíce tvarových dutin. Vytáčení jádra se provádí pomocí elektrického, hydraulického nebo pneumatického zařízení, které je zabudováno do formy. [22]

Materiály pro výrobu vstřikovací formy

Vstřikovací forma není vyrobena pouze z jednoho druhu materiálu. Na základě toho, z jakého materiálu je vstřikovací forma vyrobena se odvíjí i její cena. Při volbě, z jakého materiálu se vstřikovací forma vyrobí je nutné vzít v úvahu druh vstřikovaného polymeru, velikost a složitost výrobku, odolnost proti opotřebení a korozi, počet vyráběných kusů a požadované fyzikální a mechanické vlastnosti. [23]

Nejvýznamnější materiál pro výrobu vstřikovací formy je ocel, která svou pevností a dalšími mechanickými vlastnostmi se dá těžko nahradit. Ocelí je však velké množství a každá má své specifické vlastnosti. Například pro výrobu tvarových dutin a mechanicky namáhaných částí formy se používá ocel nástrojová, cementační nebo legovaná. Kromě ocelí se používá i jiný materiál jako je hliník, dural, mosaz a nejčastější izolační a ochranné materiály. [23]

Manipulace a skladování vstřikovací formy

Manipulací vstřikovací formy se rozumí její přemísťování nebo přemísťování jejich dílů během výroby. Při manipulaci se používají různá zdvihovací zařízení jako například pojízdné vysoko zdvižné vozíky, vybavené různým speciálním zařízením, jeřábové dráhy,

pojízdne portálové jeřáby i různé ručně pojízdné stoly. Ty jsou používány u forem, které mají malou hmotnost. [24]

Vstřikovací formy se skladují ve skladu k tomu určeném, ale ten existuje pouze u velkých firem. Obvykle jsou vstřikovací formy skladovány s výrobním a ostatním materiálem na volném prostranství skladu na paletách. Těžké formy se skladují v dosahu vhodného manipulačního prostředku. Každá vstřikovací forma má při skladování u sebe příslušné doklady, které obsahují její stav. Tato evidence je důležitá z důvodu základních údajů. Například využití formy ve výrobě, počet vyrobených kusů a oprav, pohyby mezi jednotlivými středisky a náhradní díly. [24]

Údržba vstřikovací formy

Údržba vstřikovací formy je nutná pro udržení dobré provozuschopnosti a dostatečné životnosti formy. Vstřikovací formy se udržují tak, že se provádí jejich čištění od zbytku plastů a jiných chemických produktů a dobrým mazáním všech pohyblivých dílů. Pokud dojde k poškození jakéhokoliv funkčního dílu, je nutné zajistit jeho úpravu nebo náhradu. Ta probíhá formou nanášením kovu, broušením nebo vyvločkováním. [24]

2. 7 Materiálová databáze a normy

Z důvodu, že vznikla rostoucí spotřeba plastů a také nárůst jejich výroby tak vznikl i problém porovnání jejich vlastností od různých výrobců. Do poloviny osmdesátých let minulého století výrobci termoplastů údaje o vyráběných granulátech zveřejňovali pouze ve svých podkladech. Tím vznikla situace, že každý výrobce vstřikovacích materiálů postupoval podle své vlastní metodiky a data tak nebyla mezi výrobci porovnatelná. [1]

V roce 1988 byla zveřejněna první verze databáze materiálových dat, které byly vzájemně porovnatelné a dostala název CAMPUS – Computer Aided Material Preselection by Uniform Standards. CAMPUS je materiálový informační systém pro plastikářský průmysl a jedná se o jedinou databázi, která výhradně nabízí vysoce kvalitní a srovnatelné informace o materiálech, které jsou zcela omezeny na jednotné standardy. [25]

Od roku 1990 jsou celosvětově všechna data získávána na zkušebních tělesech a podle zkušebních postupů, které jsou definované normami ISO v některých případech i ASTM International – American Society for Testing and Materials. [1]

V dnešní době tvoří databáze CAMPUS datový katalog, který je normovaný normami ISO 10350 a ISO 11403.

- *ISO 10350 Plasty – Získávání a prezentace srovnatelných jednobodových dat*

Tento soubor norem představuje první kroky k účinnému výběru a použití plastů v mnoha aplikacích, pro něž byly plasty zamýšleny a určuje konkrétní zkušební metody pro stanovení a prezentaci srovnatelných hodnot určitých základních vlastností plastů. [26]

Soubor norem ISO 10350 se zabývá zkouškami, které poskytují jednobodové hodnoty pro omezený počet vlastností běžně obsažených v normách výrobku a používaných pro předběžný výběr materiálů. Jednobodové hodnoty tak představují nejzákladnější způsob specifikace vlastností materiálů. [26]

- *ISO 11403 Plasty – Získávání a prezentace srovnatelných vícebodových dat*

Předmětem této normy je specifikace zkušebních postupů pro stanovení a prezentaci vícebodových hodnot následujících mechanických vlastností plastů, a to konkrétně dynamický modul, tahové vlastnosti při konstantní zkušební rychlosti, maximální napětí a poměrné prodloužení, tahové křivky napětí – poměrné prodloužení, kríp v tahu, rázová houževnatost Charpy a víceosé rázové chování. Tyto zkušební metody a podmínky jsou většinou vhodné pro plasty, které lze vstříkovat, lisovat nebo zpracovat v podobě desek o určité tloušťce z nichž jsou poté zkušební tělesa o vhodné velikosti zhotovena obráběním. [27]

Národní normy (ČSN) a evropské normy (ČSN EN ISO), které jsou převzaté do portfolia českých technických norem platných pro plasty jsou zařazeny do třídy 64 – Plasty.

V souvislosti s technickými normami je právní úprava technické normalizace obsažena v zákonu č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky, a ve změnách a doplnění některých zákonů, který nabyl účinnosti 1. září 1997. [1]

Tento zákon upravuje:

- a) způsob stanovování technických požadavků na výrobky, které by mohly ve zvýšené míře ohrozit zdraví nebo bezpečnost osob, majetek nebo životní prostředí*
- b) práva a povinnosti osob, které uvádějí nebo distribuují, případně uvádějí do provozu výrobky, které by mohly ve zvýšené míře ohrozit oprávněný zájem*
- c) práva a povinnosti osob pověřených k činnostem tohoto zákona, které souvisí s tvorbou a uplatňováním českých technických norem*

- d) způsob zajištění informačních povinností souvisejících s tvorbou technických předpisů a technických norem vyplývajících z mezinárodních smluv a požadavků práva Evropských společenství

Základní pojmy:

Výrobek

Jedná se o jakoukoliv věc, která byla vyrobena, vytěžena nebo jinak získána a je určena k uvedení na trh jako nová nebo použitá.

Výrobce

Jedná se o osobu, která vyrábí nebo jen navrhla výrobek. Může se jednat i o osobu, která sestavuje, balí, zpracovává nebo označuje výrobek za který odpovídá a který hodlá uvést na trh pod svým jménem, popřípadě ochrannou známkou.

Dovozce

Jedná se o osobu, která je usazená v členském státě Evropské unie a která uvede na trh výrobek z jiného než členského státu Evropské unie.

Zplnomocněný zástupce

Jedná se o osobu usazenou v členském státě Evropské unie, která je výrobcem písemně pověřena k jednání za něj.

Distributor

Jedná se o toho, kdo v dodavatelském řetězci dodává výrobky na trh.

Technické požadavky na výrobek

Jedná se o technickou specifikaci výrobku, která stanovuje charakteristiku výrobku jako je úroveň jakosti, užité vlastnosti, bezpečnost a rozměry. Zahrnují i požadavky na název výrobku, zkušební metody, požadavky na balení, označování výrobku a opatřování výrobku štítkem. Obsahují i požadavky, které se týkají životního cyklu výrobku, poté co je uveden na trh nebo provozu, tyto požadavky zahrnují recyklaci, opětovné použití nebo zneškodnění výrobku. [28]

- Zákon č. 102/2001 Sb. – Zákon o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů

Účelem tohoto zákona je zajistit v souladu s právem Evropských společenství, aby výrobky uváděné na trh nebo do oběhu byly z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví pro spotřebitele bezpečné. Zároveň posuzuje bezpečnost výrobku a jeho rizika, která jsou s užíváním výrobku spojená.

Základní pojmy:

Výrobek

Pro účel tohoto zákona se jedná o jakoukoliv movitou věc, která byla vytěžena, vyrobena nebo jinak získána a je určena k nabídce spotřebiteli.

Průvodní dokumentace

Jedná se o doklady k výrobku, které jsou nutné k převzetí a užívání zboží.

Orgán dozoru

Provádí kontroly vlastností výrobků z hlediska bezpečnosti, odebírají vzorky z výrobků a posuzují, zda výrobek může být uveden na trh. [29]

3 METODIKA PŘÍPRAVY VSTUPNÍ SUROVINY S PŘÍDAVKEM RECYKLÁTU

V této části mé diplomové práce se budu zabývat měřením mechanických vlastností materiálu na bázi polyftalamidu (PPA) vyztuženého 35 % skelnými vlákny jehož značení je PPA 6.6 s 35 % skelnými vlákny. Testovaný materiál má název Zytel HTN54G35HSLR NC010 a je od společnosti DuPont.

3.1 Specifikace materiálu

Polyftalamid

Polyftalamid je polymer ze skupiny polyamidů a jedná se o kopolymerní materiál, který se používá ve formě kompozitů vyztužených skelnými vlákny. Jedná se o materiál určený pro náročnější aplikace, což se také odráží v jeho ceně. Mezi vlastnosti polyftalamidu patří chemická odolnost, vyšší pevnost a tuhost při zvýšených teplotách, odolnost proti tečení a úpravě, citlivost na absorpci vlhkosti a prostorová stabilita. Polyftalamid je recyklovatelný přetavením. [30]

Skelná vlákna

Skelná vlákna jsou nejpoužívanějším typem vyztužující fáze v polymerních kompozitech. Průměr skelných vláken je mezi 3 až 20 mikrometry a délka skelných vláken závisí na typu kompozitu a technologii výroby. Mezi hlavní vlastnost skelného vlákna patří vysoká pevnost. [31]

Materiál Zytel HTN54G35HSLR NC010

Tento typ materiálu je používán převážně v automobilovém průmyslu a je upravován tak aby odolával extrémním podmínkám jako je dlouhodobé vystavení teple, chemikáliím a vlhkosti. Vybrané mechanické vlastnosti tohoto materiálu znázorňuje tabulka č. 5. Vybrané tepelné vlastnosti znázorňuje tabulka č. 6 a ostatní vlastnosti tohoto materiálu znázorňuje tabulka č. 7.

Tabulka 5 Vybrané mechanické vlastnosti materiálu Zytel HTN54G35HSLR NC010

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Norma
Napětí na mezi kluzu v tahu	180	MPa	ISO 527
Deformace při přetržení	3,0	%	ISO 527
Modul pružnosti v tahu	10 000	MPa	ISO 527
Instrumentovaná vrubová houževnatost (Charpy) při – 40 °C	9	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Instrumentovaná vrubová houževnatost (Charpy) při 23 °C	12	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Neinstrumentovaná vrubová houževnatost (Charpy)	75	kJ/m ²	ISO 179/1eU

Tabulka 6 Vybrané tepelné vlastnosti materiálu Zytel HTN54G35HSLR NC010

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Norma
Teplota tepelného průhybu při 0,45 MPa	285	°C	ISO 75-1/-2
Teplota tepelného průhybu při 1,80 MPa	255	°C	ISO 75-1/-2
Teplota tání při 10 °C/min	300	°C	ISO 11357-1/-3

Tabulka 7 Ostatní vlastnosti materiálu Zytel HTN54G35HSLR NC010

Vlastnosti	Hodnota	Jednotka	Norma
Hustota	1 420	kg/m ³	ISO 1183
Absorpce vody po dobu 24 h	0,64	%	ISO 62
Normální smrštění při 2,0 mm	0,6	%	ISO 294-4
Paralelní smrštění při 2,0 mm	0,2	%	ISO 294-4
Rozsah teploty taveniny	320–330	°C	
Optimální teplota taveniny	325	°C	
Optimální teplota nástroje	85-135	°C	
Doba sušení	6-8	h	
Teplota sušení	100	°C	
Zbytkový obsah vlhkosti před zpracování	<0,10	%	

3.2 Příprava materiálu

Materiál Zytel HTN54G35HSLR NC010 byl dodán ve formě granulí o velikosti 5 mm v hermeticky uzavřeném balení, což představuje obal, u něhož nedochází k výměně látek mezi jeho vnitřním prostorem a vnějším prostředím (vzduch, světlo, vlhkost).

Materiál byl před samotným testováním dle doporučení dodavatele sušen 6 hodin. Teplota v suchu vzdušné sušárně byla nastavena na 100 °C, rosný bod vháněného vzduchu pro vysoušení granulátu byl -30°C. Pro generování suchého vzduchu byla použita sucho vzdušná sušárna Motan LA 600. Po uplynutí 6 hodin sušení jsem odebral vzorek 17 gramů vysušeného materiálu pro kontrolní měření zbytkové vlhkosti materiálu. Na přístroji Aquatrac jsem naměřil hodnotu 0,0403 % zbytkového obsahu vlhkosti materiálu, což je odpovídající hodnota vlhkosti materiálu dle doporučení dodavatele před jeho samotným zpracováním.

Materiál byl následně dopraven potrubní cestou pomocí vakua do jedné ze čtyř násypek gravimetrické jednotky od značky Motan. Zároveň jsem si na zubovém drtiči Rapid RG2 připravil drť tohoto materiálu z vtoků aktuální výroby viz. obrázek č. 7, kterou jsem nasypal do druhé ze čtyř násypek gravimetrické jednotky. Zbylé dvě násypky gravimetrické jednotky zůstali prázdné.



Obrázek 7 Drť z vtoků aktuální výroby [46]

Dle navolených parametrů došlo v gravimetrické jednotce k mísení surového materiálu s drtí, a to v poměrech bez obsahu recyklátu, s 25 % obsahu recyklátu, s 33 % obsahu recyklátu, s 50 % obsahu recyklátu a nakonec se 100 % recyklátu. Dohromady bylo tedy v daných poměrech připraveno 5 vzorků. Každý vzorek jsem po 5 kilogramech nasypal do polyethylenových obalů, které jsem následně dopravil do zkušebny mechanických vlastností plastů.

3.3 Zkoušky materiálu

Zkoušky materiálu jsem prováděl ve společnosti UNIPETROL RPA, s.r.o. – POLYMER INSTITUTE BRNO, která se zaměřuje na mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti plastů. Pro samotné zkoušky byla zvolena zkušební laboratoř akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005.

Z dopravených vzorků byla ve zkušební laboratoři zhotovena zkušební tělesa viz obrázek č. 8. Ta byla vyrobena formou vstřikování na vstřikolisu. Každý vzorek byl vstřikován do formy, která je znázorněna na obrázku č. 9.



Obrázek 8 Zkušební tělesa [46]



Obrázek 9 Forma pro výrobu zkušebních těles [46]

3.3.1 Laboratorní zkoušky materiálu

V laboratoři byly provedeny zkoušky mechanických vlastností materiálu. Mechanickým zkoušením se sledují vlastnosti materiálu při působení mechanických sil. Působení vnější mechanické síly na těleso vyvolá změnu jeho tvaru takzvanou deformaci, s tím, že velikost a charakter deformace závisí na velikosti a druhu namáhání. Zjišťování mechanických vlastností je velmi významné při výzkumu a vývoji nových materiálů, při zjišťování a ověřování jejich vlastností, v rámci mezioperační kontroly při výrobě, ale také při kontrolách jakosti.

Zkoušky materiálu proběhly podle způsobu zatěžování, a to konkrétně stanovení jeho tahových a ohybových vlastností a rázové houževnatosti.

Testy materiálu se provádějí z hlediska budoucí bezpečnosti výrobku. Výrobce nebo zákazník může zvolit na základě zjištěných vlastností technologii recyklace.

Tahové vlastnosti

Problematiku tahových vlastností definuje norma *ČSN EN ISO 527-2 Plasty-Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Pro jednotlivé zkušební metody tahových vlastností se používají zkušební tělesa na zvolené rozměry buď tvářená nebo obrobená, vyřezávaná nebo vysekávaná ze vstřikovaných nebo lisovaných desek.* [36]

Při této zkoušce je zkušební těleso protahováno ve směru své podélné osy konstantní rychlostí až do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu (zatížení) nebo protažení (poměrné prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty. Měří se zatížení působící na těleso a prodloužení nebo se přímo v průběhu zkoušky trvale zaznamenává síla a prodloužení tělesa. [36]

Zkušební těleso se do čelistí stroje upíná tak že jeho podélná osa je shodná s osou zatěžování. Upínací systém musí v maximální míře zabránit vyklouzávání a nesmí způsobit předčasný lom zkušebních těles. Zároveň zkušební těleso nesmí být napnuto před započítáním zkoušky. Po vyrovnaní předpětí se nastaví a připevní na počáteční měřenou část průtahoměr nebo se přiloží měřidlo poměrného prodloužení.

Výsledkem této zkoušky se určuje pevnostní charakteristika materiálu jako je modul pružnosti v tahu (E_t), mez pevnosti (σ_m), jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti (ϵ_{tm}) a jmenovité poměrné prodloužení při přetržení (ϵ_{tb}). [36]

Zkouška modulu pružnosti v tahu (E_t)

Modul pružnosti v tahu vyjadřuje tuhost materiálu, s tím že čím vyšší hodnota modulu pružnosti je, tím vyšší je tuhost materiálu. Hodnota modulu pružnosti (E) se stanovuje z deformačních křivek v oblasti, kde je patrná lineární závislost napětí (σ) na poměrném prodloužení (ϵ). Pro tuto oblast platí tzv. Hookův zákon viz. rovnice (1), který říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu. Popisuje tedy pružnou deformaci materiálu působením malých sil, která po odlehčení vymizí. [5] [6]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

Tato zkouška byla provedena v laboratorních podmínkách při teplotě 24 °C a při relativní vlhkosti 32 %. Další podmínky zkoušky jsou znázorněny v tabulce č. 8. Pro tuto zkoušku byl zvolen univerzální měřicí přístroj Instron 4466 viz. obrázek č. 10.

Tabulka 8 Podmínky zkoušky modulu pružnosti v tahu

Podmínky	Hodnoty
Nominální teplota	23 °C
Forma materiálu	vstříkovaná tělesa
Teplota kondicionace	23 °C
Relativní vlhkost kondicionace	0 %
Čas kondicionace	> 24 h
Počet zkušebních těles	5 ks
Typ zkušebních těles	1 A
Šířka pracovní části	10 mm
Tloušťka pracovní části	4 mm
Rozsah indikátoru síly	10 kN
Typ indikátoru poměrného prodloužení	mechanický
Rozsah indikátoru poměrného prodloužení	10 %
Počáteční měřená délka L_0	50 mm
Typ upínacího zařízení	pneumatické
Upínací vzdálenost mezi čelistmi L	115 mm
Zkušební rychlost	1 mm/min



Obrázek 10 Měřicí přístroj Instron 4466 [46]

Hodnoty této zkoušky u použitého materiálu přidaného recyklátu znázorňuje tabulka č. 9, kde je u každého procenta recyklátu znázorněna průměrná hodnota, směrodatná odchylka a nejistota v jednotce megapascalu (MPa).

Tabulka 9 Hodnoty zkoušky modulu pružnosti v tahu

Množství recyklátu (%)	Průměrná hodnota (MPa)	Směrodatná odchylka (MPa)	Nejistota (MPa)
0	11080	310	620
25	11090	340	680
33	11220	420	840
50	11020	230	460
100	10330	150	300

Zkoušky meze pevnosti (σ_m), jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti (ϵ_{lm}) a při přetržení (ϵ_{tb})

Mez pevnosti určuje maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle (F_{max}) naměřené v průběhu zkoušky. V případě, že se překročí mez pevnosti dojde následně k přetržení materiálu. Hodnota meze pevnosti je stanovena na základě rovnice (2), kde S_0 je původní průřez. [6]

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (2)$$

Jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti odpovídá mezi pevnosti, pokud se tento bod nachází za mezí kluzu.

Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení odpovídá napětí při přetržení, dochází-li k přetržení zkušebního tělesa zamezí kluzu viz obrázek č. 11.

Tyto zkoušky byly provedeny v laboratorních podmínkách při teplotě 23,9 °C a při relativní vlhkosti 24 %. Další podmínky zkoušky jsou znázorněny v tabulce č. 10. Pro tyto zkoušky byl zvolen univerzální měřicí přístroj Instron 4466 jako u zkoušky předchozí. Na obrázku č. 12 je znázorněn měřicí přístroj i včetně zkušebního tělesa během těchto prováděných zkoušek.



Obrázek 11 Přetržení zkušebního tělesa [46]

Tabulka 10 Podmínky zkoušek meze pevnosti, jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení

Podmínky	Hodnoty
Nominální teplota	23 °C
Forma materiálu	vstřikovaná tělesa
Teplota kondicionace	23 °C
Relativní vlhkost kondicionace	0 %
Čas kondicionace	> 24 h
Počet zkušebních těles	5 ks
Typ zkušebních těles	1 A
Šírka pracovní části	10 mm
Tloušťka pracovní části	4 mm
Rozsah indikátoru síly	10 kN
Typ indikátoru poměrného prodloužení	žádný
Typ upínacího zařízení	pneumatické
Upínací vzdálenost mezi čelistmi L	115 mm
Zkušební rychlost	5 mm/min



Obrázek 12 Měřicí přístroj Instron 4466 se zkušebním tělesem [46]

Hodnoty zkoušky meze pevnosti u použitého materiálu s procenty recyklátu znázorňuje tabulka č. 11, kde je u každého procenta recyklátu znázorněna průměrná hodnota, směrodatná odchylka a nejistota v jednotce megapascalu (MPa). Další hodnoty zkoušky jmenovitého prodloužení na mezi pevnosti znázorňuje tabulka č. 12 a hodnotu zkoušky jmenovité poměrné prodloužení při přetržení znázorňuje tabulka č. 13. Tyto dvě zkoušky opět uvádějí průměrnou hodnotu, směrodatnou odchylku a nejistotu tentokrát v jednotce %.

Tabulka 11 Hodnoty zkoušky meze pevnosti

Množství recyklátu (%)	Průměrná hodnota (MPa)	Směrodatná odchylka (MPa)	Nejistota (MPa)
0	189	5	9
25	183	3	5
33	181	4	7
50	181	2	3
100	170	1	2

Tabulka 12 Hodnoty zkoušky jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Množství recyklátu (%)	Průměrná hodnota (%)	Směrodatná odchylka (%)	Nejistota (%)
0	3,9	0,2	0,5
25	3,8	0,1	0,2
33	3,8	0,2	0,3
50	3,9	0,1	0,3
100	4,0	0,1	0,2

Tabulka 13 Hodnoty zkoušky jmenovité poměrné prodloužení při přetržení

Množství recyklátu (%)	Průměrná hodnota (%)	Směrodatná odchylka (%)	Nejistota (%)
0	4,0	0,3	0,5
25	3,9	0,2	0,4
33	3,8	0,2	0,3
50	4,1	0,2	0,4
100	4,2	0,2	0,4

Ohybové vlastnosti

Zkouška ohybových vlastností je prováděna na základě normy ČSN EN ISO 178 *Plasty-Stanovení ohybových vlastností. Tato norma uvádí metodu pro stanovení ohybových vlastností tuhých plastů a polotuhých plastů za definovaných podmínek*. [37]

Prováděná zkouška dává důležité informace o materiálu, který je při své aplikaci namáhán v ohybu. Jedná se o zkoušku, kde je zkušební těleso namáháno tlakem a tahem současně – v horních vrstvách je tlakové, směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tahové. [37]

Zkušební těleso je při zkoušce podepřeno jako nosník dvěma podpěrami a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho dokud se těleso nerozломí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty.

Výsledkem této zkoušky se stanovuje modul pružnosti v ohybu (E_f), pevnost v ohybu (σ_{fM}) a deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu (ϵ_{fM}). [37]

Zkoušky modulu pružnosti v ohybu (E_f), pevnost v ohybu (σ_{fM}) a deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu (ϵ_{fM})

Modul pružnosti v ohybu je poměr rozdílu napětí k rozdílu hodnot odpovídajících deformací.

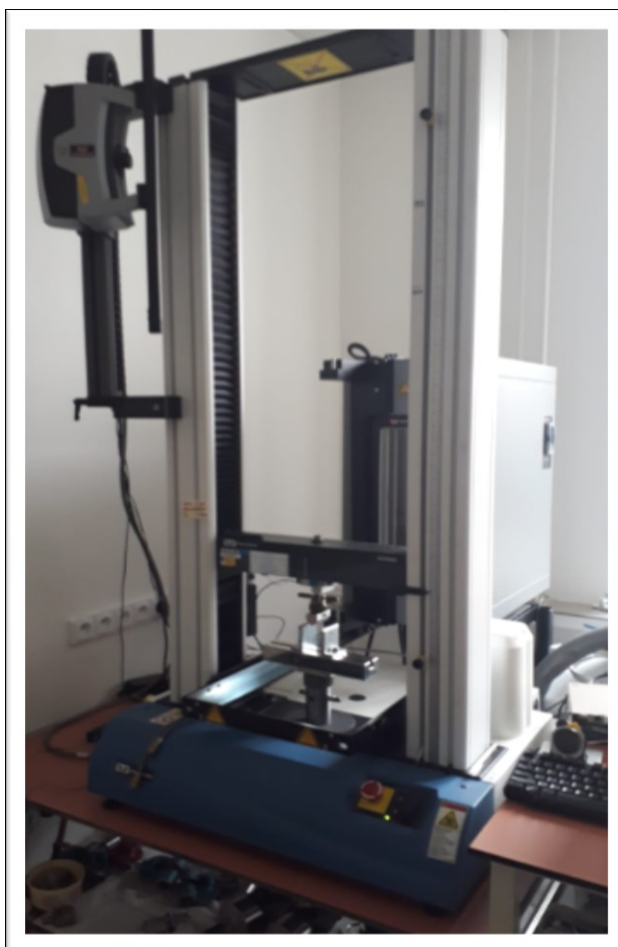
Pevnost v ohybu je maximální napětí v ohybu, které zkušební těleso snese v průběhu zkoušky ohybem a spočítá se z maximálního ohybového momentu ($M_{0, \max}$) a průřezového modulu (W_0) dle rovnice (3). Deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu je deformace ohybem při maximálním napětí v ohybu. [6]

$$\sigma_{fM} = \frac{M_{0, \max}}{W_0} \quad (3)$$

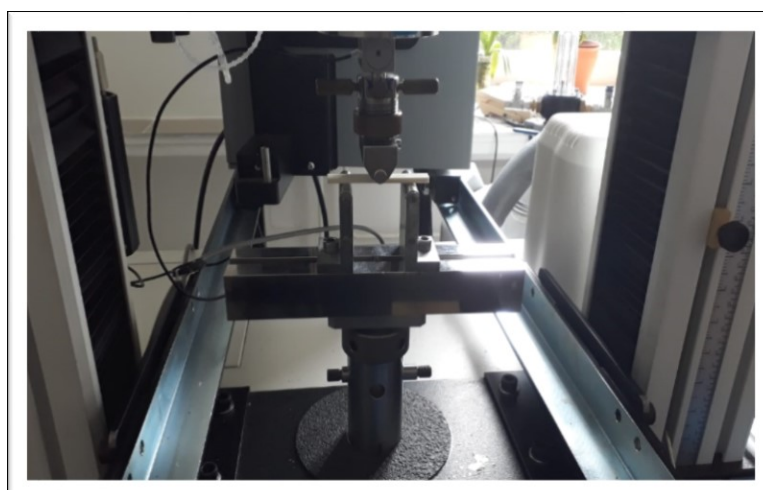
Tyto zkoušky byly provedeny v laboratorních podmínkách při teplotě 24 °C a při relativní vlhkosti 24 %. Další podmínky zkoušky jsou znázorněny v tabulce č. 14. Pro tyto zkoušky byl zvolen univerzální měřicí přístroj Instron 3366 viz obrázek č. 13. Na obrázku č. 14 se znázorněn měřicí přístroj se zkušebním tělesem v průběhu prováděných zkoušek.

Tabulka 14 Podmínky zkoušek modul pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu a deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu

Podmínky	Hodnoty
Nominální teplota	23 °C
Forma materiálu	vstřikovaná tělesa
Způsob přípravy zkušebních těles	střední část tělesa 1 A
Teplota kondicionace	23 °C
Relativní vlhkost kondicionace	0 %
Čas kondicionace	> 24 h
Rozměr těles	80 x 10 x 4 mm
Počet zkušebních těles	5 ks
Metoda	A
Rozsah indikátoru síly	1 kN
Měření průhybu	Posun křížové hlavy s opravou na poddajnost
Jmenovité rozpětí podpěr L	64 mm
Poloměr podpěr R ₂	5 mm
Počet zkušebních rychlostí	1
Zkušební rychlost (v, v ₁)	2 mm/min



Obrázek 13 Měřicí přístroj Instron 3366 [46]



Obrázek 14 Měřicí přístroj Instron 3366 se zkušebním tělesem [46]

Hodnotu zkoušky modulu pružnosti v ohybu znázorňuje tabulka č. 15 a hodnotu zkoušky pevnost v ohybu znázorňuje tabulka č. 16. U každého procenta recyklátu je znázorněna průměrná hodnota, směrodatná odchylka a nejistota v jednotce megapascalu (MPa). Další hodnotu zkoušky deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu znázorňuje tabulka č. 17. Tato zkouška opět uvádí průměrnou hodnotu, směrodatnou odchylku a nejistotu tentokrát v jednotce %.

Tabulka 15 Hodnoty zkoušky modulu pružnosti v ohybu

Množství recyklátu (%)	Průměrná hodnota (MPa)	Směrodatná odchylka (MPa)	Nejistota (MPa)
0	9500	150	300
25	9170	80	160
33	9170	50	110
50	8990	300	600
100	8930	130	260

Tabulka 16 Hodnoty zkoušky pevnost v ohybu

Množství recyklátu (%)	Průměrná hodnota (MPa)	Směrodatná odchylka (MPa)	Nejistota (MPa)
0	278	4	8
25	272	2	5
33	271	3	5
50	269	6	13
100	262	4	7

Tabulka 17 Hodnoty zkoušky deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu

Množství recyklátu (%)	Průměrná hodnota (%)	Směrodatná odchylka (%)	Nejistota (%)
0	3,6	0,1	0,1
25	3,6	0,1	0,1
33	3,7	0,0	0,0
50	3,7	0,0	0,1
100	3,9	0,1	0,2

Rázová houževnatost

Stanovení rázové houževnatosti patří spolu s pevností k nejdůležitějším materiálovým zkouškám. Houževnatost představuje energii, kterou je materiál schopen lokálně absorbovat předtím, než se poruší. [38]

Zkouška rázové houževnatosti je prováděna metodou Charpy na základě normy ČSN EN ISO 179-1 *Plasty-Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy-Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Tato metoda je vhodná ke zkoumání rázového chování určitých typů zkušebních těles v mezích daných podmínkami zkoušky. Zároveň poskytuje určité informace o chování plastů při nárazu.* [38]

Zkušební těleso je umístěné vodorovně na podpěrách a přeráženo úderem rázového kladiva, přičemž směr rázu je veden středem vzdálenosti mezi podpěrami na užší nebo širší stranu.

Během zkoušky rázové houževnatosti se zaznamenává energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa a typ přeražení, které se rozděluje na:

- C – úplné, včetně kloubového – neúplného přeražení, kdy obě části zkušebního tělesa
drží pohromadě pouze tenkou obvodovou vrstvou v podobě kloubu bez
zbytkové
tuhosti
- P – částečné přeražení
- N – nepřeraženo

Metoda Charpy zahrnuje zkoušky rázové houževnatosti (a_{cU}) a vrubové houževnatosti (a_{cN}). Rázová houževnatost se stanovuje pro materiály, které se zlomí nárazem na zkušební těleso. Pokud ovšem ke zlomení nedojde, je možné zkušební těleso zeslabit vrubem a v tomto případě se jedná o vrubovou houževnatost. [38]

Zkouška rázové houževnatosti zkušebních těles bez vrubu (a_{cU})

Rázová houževnatost zkušebních těles bez vrubu je definována jako kinetická energie (E_c) spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa vztažená na jeho původní průřez – tloušťku (h) a šířku (b) viz. rovnice (4).

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \quad (4)$$

Tato zkouška byla provedena v laboratorních podmínkách při teplotě 23,7 °C a při relativní vlhkosti 36 %. Další podmínky zkoušky jsou znázorněny v tabulce č. 18. Pro tyto zkoušky byl zvolen univerzální měřicí přístroj Zwick HIT25P viz. obrázek č. 15. Na obrázku č. 16 je znázorněn měřicí přístroj i se zkušebním tělesem.

Tabulka 18 Podmínky zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles bez vrubu

Podmínky	Hodnoty
Nominální teplota	23 °C
Forma materiálu	vstřikovaná tělesa
Způsob přípravy zkušebních těles	střední část tělesa 1 A
Teplota kondicionace	23 °C
Relativní vlhkost kondicionace	0 %
Čas kondicionace	> 24 h
Typ zkušebních těles	1
Rozměry (jmenovité)	80 x 10 x 4 mm
Vzdálenost opěr	62 mm
Poloha	edgewise (e) – ráz na užší stranu zkušebního tělesa
Typ vrubu	U (bez vrubu)
Počet zkušebních těles	10 ks
Rázová rychlost	3,8 m/s
Nominální energie rázového kladiva	15 J



Obrázek 15 Měřicí přístroj ZWICK HIT25P [46]



Obrázek 16 Měřicí přístroj ZWICK HIT25P se zkušebním tělesem [46]

Hodnoty této zkoušky u použitého materiálu s procenty recyklátu znázorňuje tabulka č. 19, kde je u každého procenta recyklátu znázorněna průměrná hodnota, směrodatná odchylka a nejistota v jednotce kJ/m².

Tabulka 19 Hodnoty zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles bez vrubu

Množství recyklátu (%)	Průměrná hodnota (kJ/m²)	Směrodatná odchylka (kJ/m²)	Nejistota (kJ/m²)
0	96	4	9
25	96	3	6
33	97	3	6
50	93	5	9
100	92	2	4

Zkouška rázové houževnatosti zkušebních těles opatřených vrubem (a_{cN})

Rázová houževnatost zkušebních těles opatřených vrubem je definována jako kinetická energie (E_c) spotřebována k přeražení zkušebního tělesa opatřeného vrubem vztažena na jeho původní průřez pod vrubem – tloušťku (h) a šířku pod vrubem (b_N) viz. rovnice (5). [6]

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \quad (5)$$

Tato zkouška byla provedena v laboratorních podmínkách při teplotě 23,7 °C a při relativní vlhkosti 36 %. Další podmínky zkoušky jsou znázorněny v tabulce č. 20. Pro tuto zkoušku byl zvolen univerzální měřicí přístroj ZWICK HIT25P jako u zkoušky předchozí. Na obrázku č. 17 je znázorněno zkušební těleso opatřené vrubem.

Tabulka 20 Podmínky zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles opatřených vrubem

Podmínky	Hodnoty
Nominální teplota	23 °C
Forma materiálu	vstřikovaná tělesa
Způsob přípravy zkušebních těles	střední část tělesa 1 A
Teplota kondicionace	23 °C
Relativní vlhkost kondicionace	0 %
Čas kondicionace	> 24 h
Typ zkušebních těles	1
Rozměry (jmenovité)	80 x 10 x 4 mm
Vzdálenost opěr	62 mm
Poloha	edgewise (e) – ráz na užší stranu zkušebního tělesa
Typ vrubu	A
Šířka pod vrubem	8,0 mm
Počet zkušebních těles	10 ks
Rázová rychlost	2,9 m/s
Nominální energie rázového kladiva	1 J



Obrázek 17 Zkušební těleso opatřené vrubem [46]

Hodnoty této zkoušky u použitého materiálu s procenty recyklátu znázorňuje tabulka č. 21, kde je u každého procenta recyklátu znázorněna průměrná hodnota, směrodatná odchylka a nejistota v jednotce kJ/m^2 .

Tabulka 21 Hodnoty zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles opatřených vrubem

Množství recyklátu (%)	Průměrná hodnota (kJ/m^2)	Směrodatná odchylka (kJ/m^2)	Nejistota (kJ/m^2)
0	14,8	0,3	0,5
25	13,9	0,3	0,6
33	13,9	0,4	0,9
50	13,4	0,4	0,8
100	11,6	0,4	0,8

4 VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

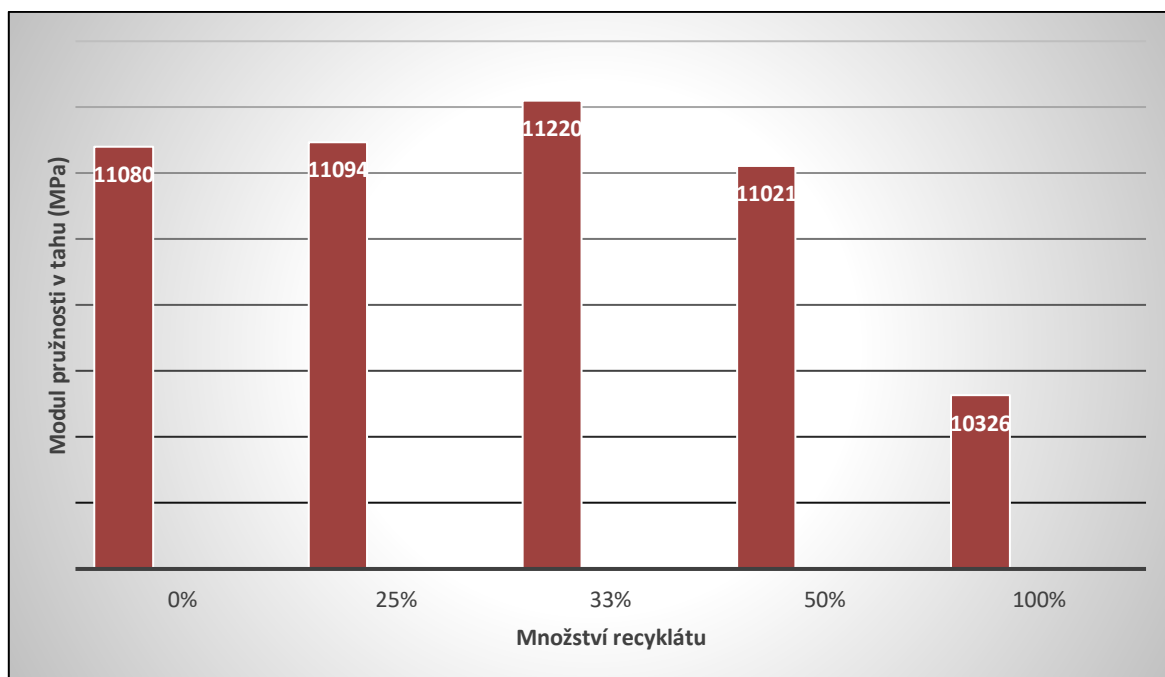
Vyhodnocení mechanických vlastností materiálu v závislosti na procentuálním zastoupením regranulátu v základním materiálu bylo stanoveno tahovou, ohybovou a rázovou zkouškou.

4.1 Vyhodnocení tahových zkoušek

Výsledek zkoušky modulu pružnosti v tahu je znázorněn v tabulce číslo 22. Výrobce materiálu uvádí hodnotu modulu pružnosti v tahu 10 000 MPa. Všechny hodnoty recyklátu splňují hodnotu, kterou výrobce uvádí, přičemž je vidět klesající trend se vzrůstajícím množstvím procent recyklátu. V grafu číslo 1 je znázorněna nejvyšší tuhost materiálu s 33 % recyklátu tudíž co se týká této vlastnosti tak 33 % množství recyklátu přidaného k základnímu materiálu pozitivně ovlivnilo tuhost materiálu.

Tabulka 22 Výsledek zkoušky modulu pružnosti v tahu

Množství recyklátu v %	Výsledky v jednotce MPa
0	11080 ± 308
25	11094 ± 338
33	11220 ± 419
50	11021 ± 230
100	10326 ± 149

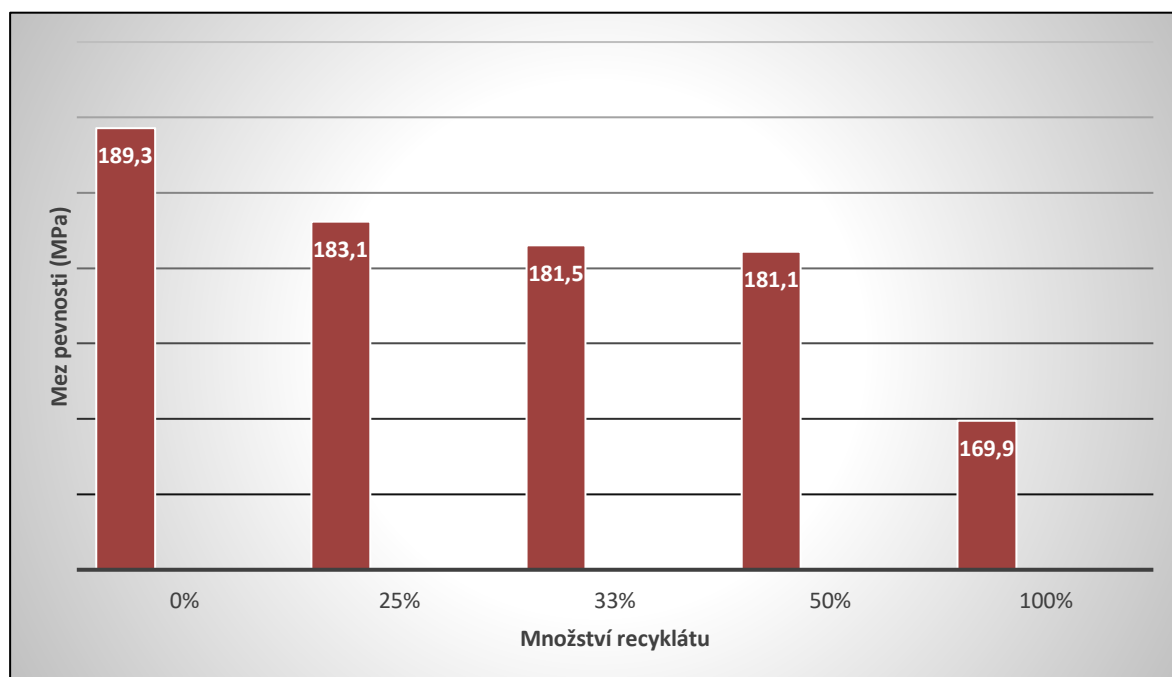


Graf 1 Výsledek zkoušky modulu pružnosti v tahu

Výsledek zkoušky meze pevnosti je znázorněn v tabulce číslo 23. Výrobce materiálu uvádí hodnotu meze pevnosti 180 MPa. V grafu číslo 2 je znázorněno, že materiál bez recyklátu a s 25 % recyklátu splňuje hodnotu meze pevnosti, kterou výrobce uvádí, přičemž čím více procent recyklátu je přidáno k základnímu materiálu tím menší je mez pevnosti. Co se týká materiálu s 33 % a s 50 % recyklátu, tak tyto výsledky se dají brát jako přijatelné hodnoty, nicméně s ohledem na nejistotu při měření je potřeba počítat že může hodnota klesnout pod 180 MPa což je mimo stanovenou hodnotu výrobce.

Tabulka 23 Výsledek zkoušky meze pevnosti

Množství recyklátu v %	Výsledky v jednotce MPa
0	189,3 ± 4,7
25	183,1 ± 2,5
33	181,5 ± 3,7
50	181,1 ± 1,7
100	169,9 ± 0,8

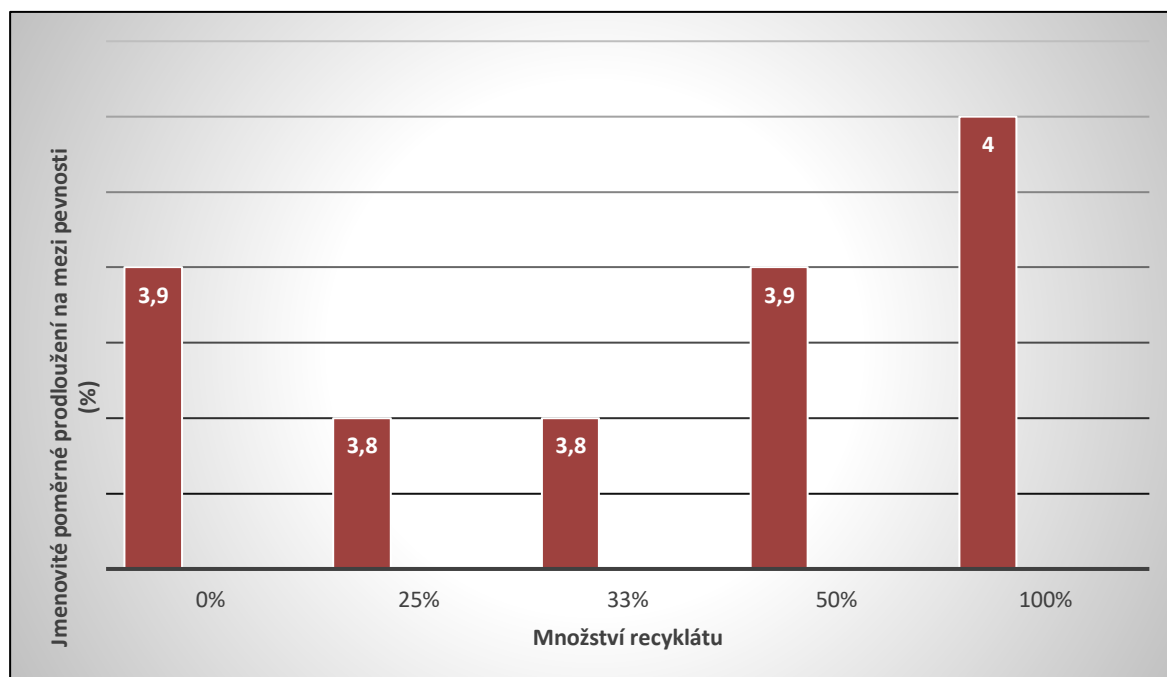


Graf 2 Výsledek zkoušky meze pevnosti

Výsledek zkoušky jmenovitého poměrného prodloužení na mezi pevnosti je znázorněn v tabulce číslo 24 a výsledek zkoušky jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení je znázorněn v tabulce číslo 25. Výrobce materiálu uvádí hodnotu jmenovitého poměrného prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení 3 %. Jak znázorňují grafy číslo 3 a 4, tak obsah recyklátu nemá negativní dopad na tuto vlastnost materiálu. V tomto případě je tedy možné při výrobě plastových dílů používat libovolné množství recyklátu, aniž by to ovlivnilo tahové vlastnosti výrobku.

Tabulka 24 Výsledek zkoušky jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti

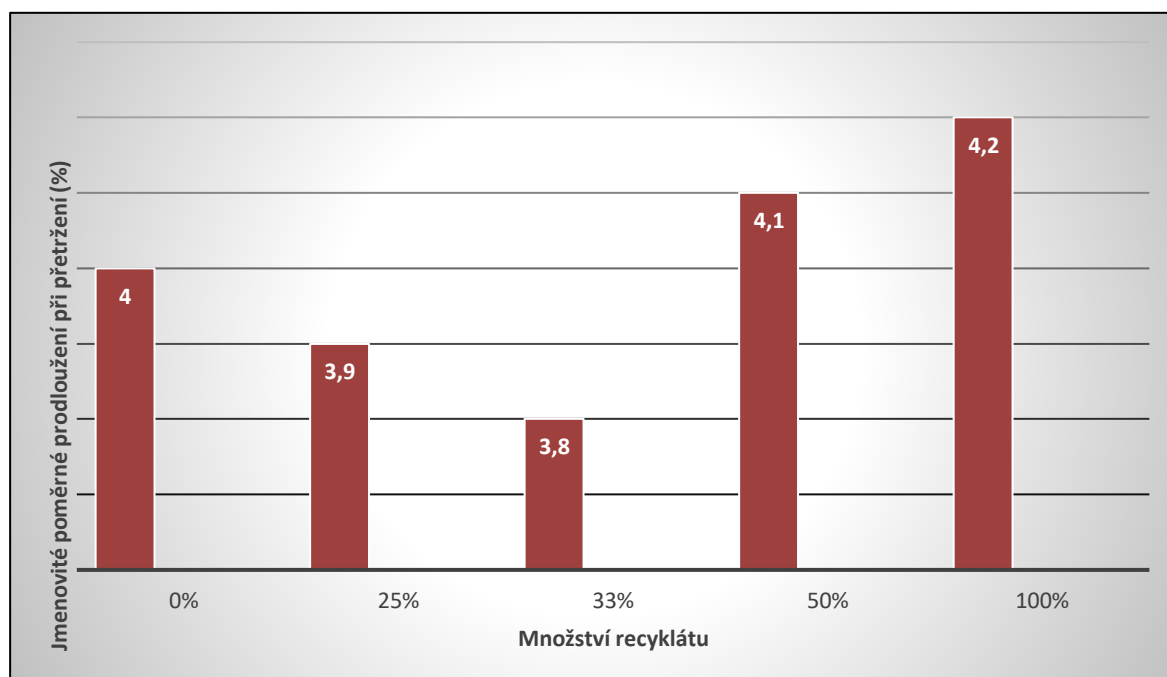
Množství recyklátu v %	Výsledky v %
0	$3,9 \pm 0,2$
25	$3,8 \pm 0,1$
33	$3,8 \pm 0,2$
50	$3,9 \pm 0,1$
100	$4,0 \pm 0,1$



Graf 3 Výsledek zkoušky jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Tabulka 25 Výsledek zkoušky jmenovité poměrné prodloužení při přetržení

Množství recyklátu v %	Výsledky v %
0	$4,0 \pm 0,3$
25	$3,9 \pm 0,2$
33	$3,8 \pm 0,2$
50	$4,1 \pm 0,2$
100	$4,2 \pm 0,2$



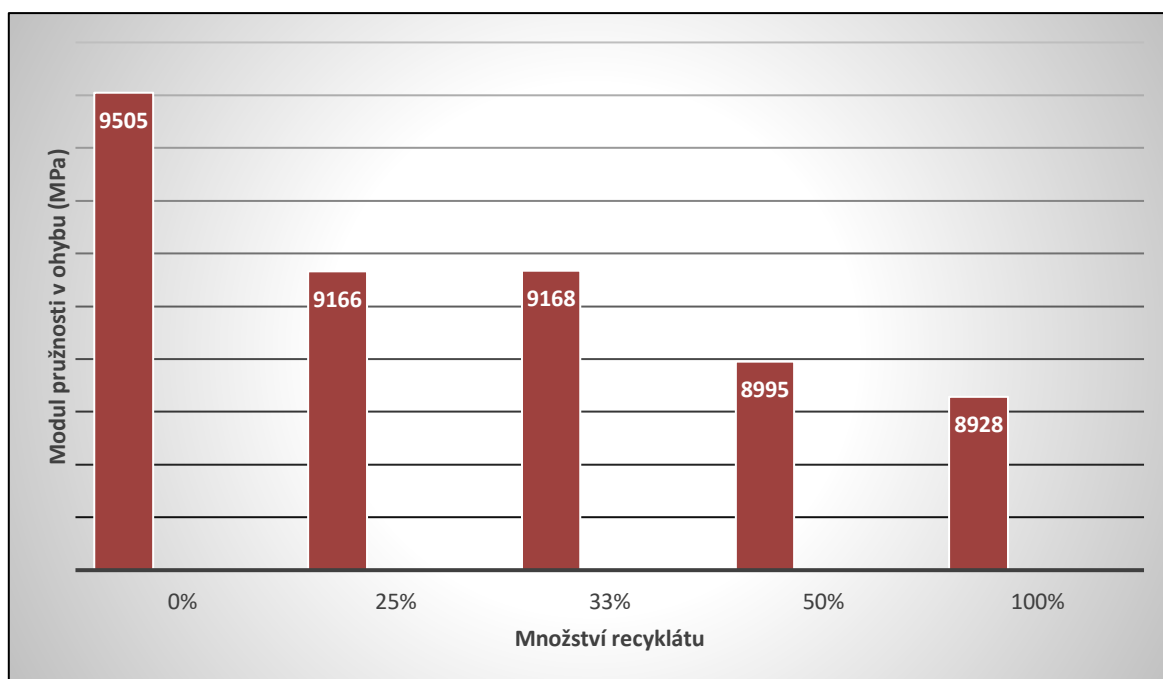
Graf 4 Výsledek zkoušky jmenovité poměrné prodloužení při přetržení

4.2 Vyhodnocení ohybových zkoušek

Výsledek zkoušky modulu pružnosti v ohybu je znázorněn v tabulce číslo 26. Výrobce materiálu uvádí hodnotu 9 000 MPa. V grafu číslo 5 je znázorněno, že této hodnotě odpovídá materiál od 0 % recyklátu do 33 % recyklátu, přičemž čím vyšší procento recyklátu je obsaženo v základním materiálu, tím dochází ke snížení ohybové vlastnosti materiálu.

Tabulka 26 Výsledek zkoušky modulu pružnosti v ohybu

Množství recyklátu v %	Výsledky v MPa
0	9505 ± 150
25	9166 ± 81
33	9168 ± 54
50	8995 ± 302
100	8928 ± 132



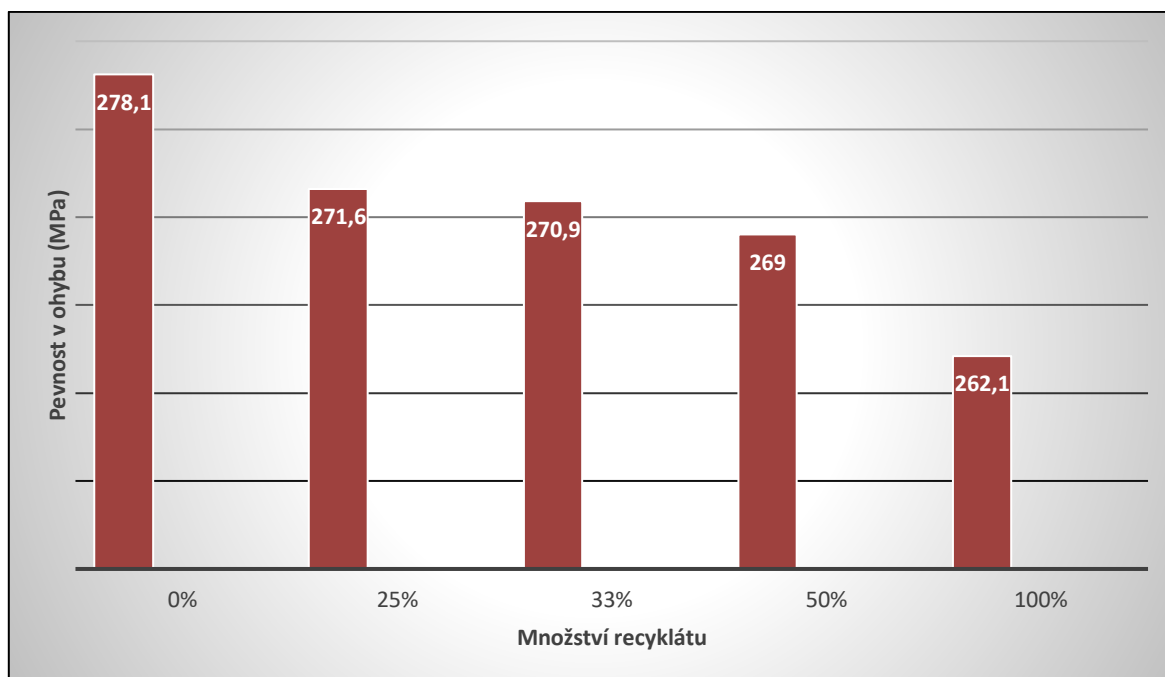
Graf 5 Výsledek zkoušky modulu pružnosti v ohybu

Výsledek zkoušky pevnosti v ohybu je znázorněn v tabulce číslo 27 a výsledek zkoušky deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu je znázorněn v tabulce číslo 28. Zkouška pevnosti v ohybu což znázorňuje graf číslo 6 je přijatelná od 0 % recyklátu do 50 % recyklátu. Hodnota se 100 % recyklátu je již nepřijatelná, proto nelze zvolit větší množství jak 50 % recyklátu u pevnosti materiálu v ohybu.

Zkoušku deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu znázorňuje graf číslo 7 a ukazuje o kolik procent se zdeformovalo zkušební těleso, než došlo k jeho prasknutí. Při této zkoušce těleso se 100 % recyklátem podleho prasknutí při nejmenší síle.

Tabulka 27 Výsledek zkoušky pevnost v ohybu

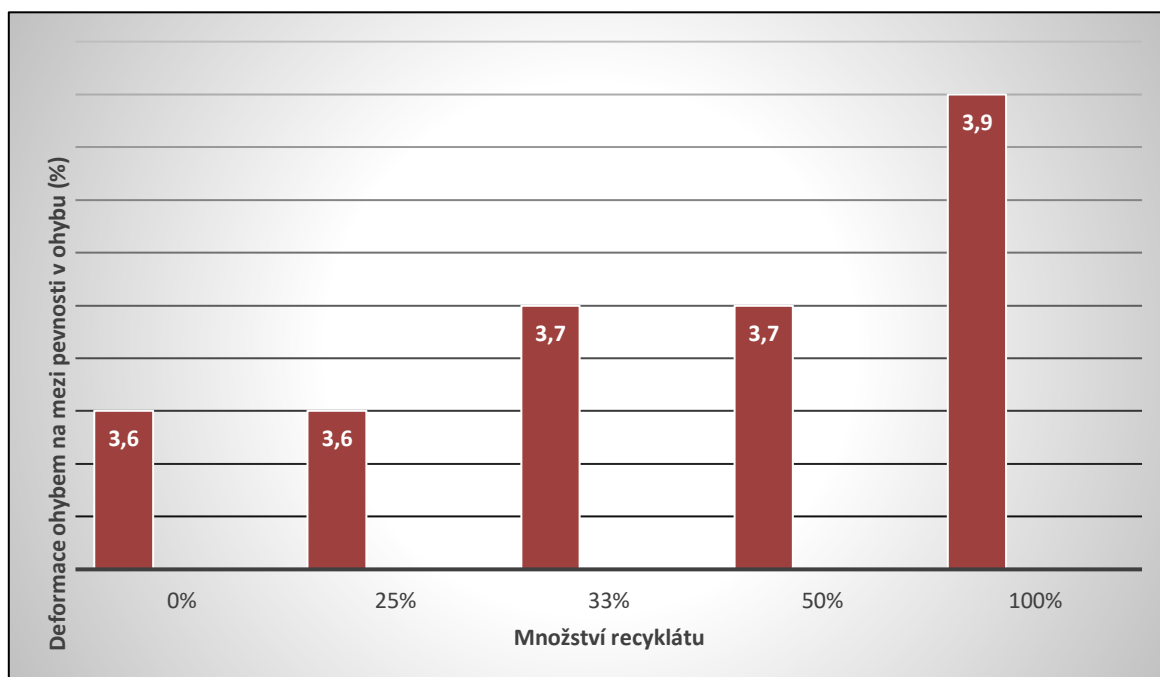
Množství recyklátu v %	Výsledky v MPa
0	278,1 ± 3,8
25	271,6 ± 2,4
33	270,9 ± 2,5
50	269,0 ± 6,4
100	262,1 ± 3,7



Graf 6 Výsledek zkoušky pevnost v ohybu

Tabulka 28 Výsledek zkoušky deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu

Množství recyklátu v %	Výsledky v %
0	3,6 ± 0,1
25	3,6 ± 0,1
33	3,7
50	3,7 ± 0,0
100	3,9 ± 0,1



Graf 7 Výsledek zkoušky deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu

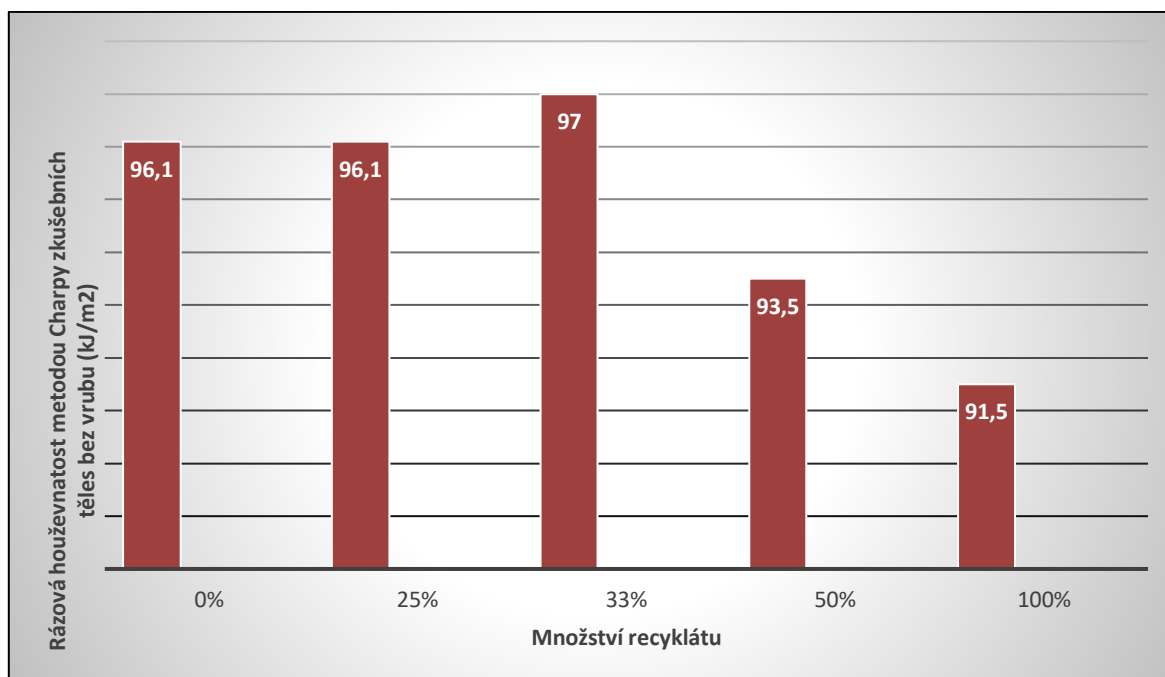
4.3 Vyhodnocení rázových zkoušek

Výsledek zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy byl proveden na zkušebních tělesech bez vrubu a s vrubem. Výsledek zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles bez vrubu je uveden v tabulce číslo 29. V grafu číslo 8 je znázorněno že nejvyšší energii k přeražení bylo potřeba u 33 % recyklátu. Ovšem při této zkoušce došlo u všech hodnot recyklátu k přeražení zkušebních těles.

Výsledek zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles s vrubem je uveden v tabulce číslo 30. V grafu číslo 9 je znázorněno, že pouze u čistého recyklátu je hodnota přeražení nižší, než uvádí výrobce materiálu.

Tabulka 29 Výsledek zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy zkušebních těles bez vrubu

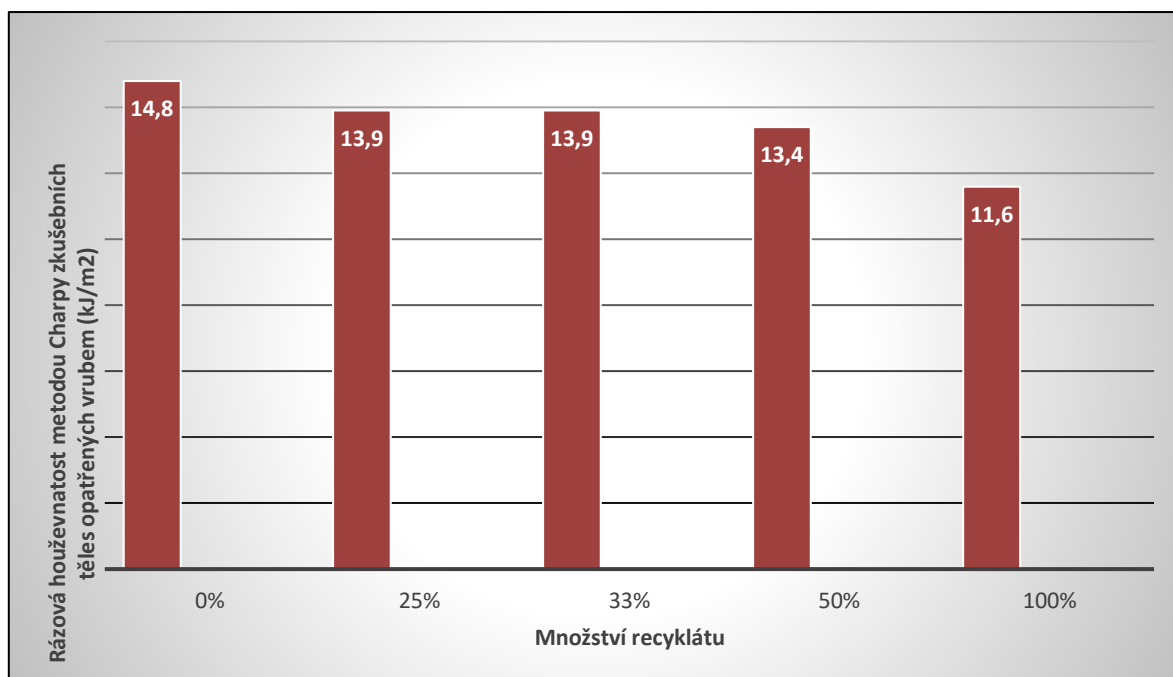
Množství recyklátu v %	Výsledky v kJ/m ²
0	96,1 ± 4,4
25	96,1 ± 3,2
33	97,0 ± 2,8
50	93,5 ± 4,6
100	91,5 ± 2,1



Graf 8 Výsledek zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy zkušebních těles bez vrubu

Tabulka 30 Výsledek zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy zkušebních těles opatřených vrubem

Množství recyklátu v %	Výsledky v kJ/m ²
0	14,8 ± 0,3
25	13,9 ± 0,3
33	13,9 ± 0,4
50	13,4 ± 0,4
100	11,6 ± 0,4



Graf 9 Výsledek zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy zkušebních těles opatřených vrubem

5 ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo zkoumání vlivu plastového recyklátu na mechanické vlastnosti výrobku. Zkoušky mechanických vlastností jsem prováděl na materiálu Zytel HTN54G35HSLR NC010 s přídavkem recyklátu, a to v poměru hodnot 0 %, 25 %, 33 %, 50 % a 100 % recyklátu.

Tento materiál používá společnost, kterou jsem byl pověřen vyřešit konkrétní případ, a to v podobě snížení nákladů zákazníkovi a navrhnout pro něj řešení. Tato společnost se zabývá výrobou plastových dílů a jedním z výrobků je díl do řídicí sestavy automobilů pro snímání polohy volantu. Společnost pro tento díl vždy přidává 25 % recyklátu k surovému materiálu, ale dalších 8 % recyklátu tvoří přebytek v podobě studených vtoků z výroby. Vzniká tak situace, kdy společnost musí tyto přebytky v podobě odpadu nechat externě vyvážet, což je finančně nákladné. Tento vzniklý odpad je ovšem možné použít do výroby nových výrobků. Nastává tak proces, kde je nutná specifikace odpadu a jeho správné připravení pro vylišování zkušebních těles, tak aby odpad neobsahoval vlhkost. Ta by mohla ovlivnit mechanické vlastnosti výrobku a také zkoušky na tělesech by mohly vykazovat mylné výsledky.

Proto jsem provedl zkoušky v tahových a ohybových vlastnostech a rázové houževnatosti metodou Charpy.

V tahových vlastnostech byla provedena zkouška modulu pružnosti v tahu, kde výsledek vyšel velmi pozitivně, a to z důvodu že ať je přidán k základnímu materiálu jakékoliv procento výše uvedeného recyklátu, tak výsledek splňuje hodnotu, kterou výrobce materiálu uvádí. Nejlépe z této zkoušky vyšlo 33 % recyklátu přidaného k základnímu materiálu a vykazuje tím tak největší tuhost materiálu. Zkouška meze pevnosti v tahových vlastnostech dopadla dobře pouze pro materiál s 0 %, 25 % a 33 % recyklátu, jelikož čím vyšší je procento přidávaného recyklátu tím nižší je hodnota meze pevnosti a nevykazuje se tak hodnota kterou uvádí výrobce materiálu. Poslední zkoušky v tahových vlastnostech byly zkoušky jmenovitého poměrného prodloužení na mezi pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení. V obou dvou zkouškách materiál obstál na výbornou a bylo zjištěno, že obsah recyklátu nemá negativní dopad na tuto vlastnost materiálu a neovlivnil by tak tahové vlastnosti výrobku.

V ohybových vlastnostech byla provedena zkouška modulu pružnosti v ohybu, kde nejlepší výsledek vykazovalo 0 %, 25 % a 33 % recyklátu v základním materiálu. V této

zkoušce jsem došel k závěru, že čím vyšší je procento recyklátu přidáno k základnímu materiálu dochází ke snížení ohybových vlastností materiálu. Zkouška pevnosti v ohybu je vhodná pro 0 % až do 50 % recyklátu k základnímu materiálu, jelikož materiál při vyšším procentu recyklátu pak nevykazuje stanovené ohybové vlastnosti. Poslední zkouškou ohybových vlastností byla zkouška deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu. Při této zkoušce nejhůře dopadl 100 % recyklát, jelikož podlehl deformaci neboli prasknutí při nejmenší vykázané síle.

V rázových zkouškách byla zvolena metoda Charpy a zkoušky byly provedeny na zkušebních tělesech bez vrubu a s vrubem. Během zkoušek došlo u všech procent recyklátu k základnímu materiálu k přeražení zkušebních těles. Přičemž nejvyšší energie se musela vynaložit u tělesa bez vrubu s 33 % recyklátu k základnímu materiálu, aby došlo k jeho přeražení. Na druhou stranu těleso s vrubem, které obsahovalo pouze čistý recyklát nevykázalo správnou hodnotu přeražení, jak uvádí výrobce materiálu, ale k jeho přeražení také došlo.

Na závěr bych chtěl poukázat na skutečnost, že ačkoliv výrobce materiálů udává maximální poměr recyklátu 25 % k základnímu materiálu při lisování plastových výrobků technologií vstřikováním, tak z mých testů je zřejmé, že lze přidávat i vyšší procento recyklátu a to do výše 33 % bez změny mechanických vlastností materiálu.

Provedené zkoušky mechanických vlastností materiálu ve spolupráci s firmou UNIPETROL RPA, s.r.o. – POLYMER INSTITUTE BRNO poukazují na konkrétní případ, ve kterém se dá snížit cena zákazníkovi vstřikovaných výrobků, a to použitím 8 % přebytků v podobě studených vtoků z výroby. Výhoda je také na straně společnosti, které se tím značně snižují náklady na vývoz vtoků, zmetků, nebo jakkoliv neshodných výrobků, které si zákazník neodebere. V tomto případě tak společnost již nepřispívá k tak známému ekologickému problému jako je zatěžování ovzduší dopravou, spalování plastů, jejich ukládání na skládky, nebo samotnou výrobou.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [2] The Importance of Recycling. EzineArticles Submission – Submit Your Best Quality Original Articles For Massive Exposure, Ezine Publishers Get 25 Free Article Reprints [online]. Copyright © 2019 EzineArticles [cit. 24.02.2019]. Dostupné z WWW: <<http://ezinearticles.com/?The-Importance-of-Recycling&id=1216700>>
- [3] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [4] Odpadní plasty – odstraňování a recyklace | Komunální technika | Server o komunálních službách [online], 2011, Dostupné z WWW: <<https://komunalweb.cz/odpadni-plasty-odstranovani-a-recyklace/>>
- [5] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [6] Polymery. Publi.cz – platforma pro multimediální eBooky neboli mKnihy [online], 2015, Dostupné z WWW: <<https://publi.cz/books/180/Cover.html>>
- [7] MIKOLÁŠ, Jan. Recyklace průmyslových odpadů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. Ochrana životního prostředí.
- [8] KUTA, Antonín. Technologie a zařízení pro zpracovávání kaučuků a plastů. Praha: VŠCHT, 2007 dotisk. ISBN 978-80-7080-367-7.
- [9] Technologie vstřikování. Publi.cz – platforma pro multimediální eBooky neboli mKnihy [online], 2015, Dostupné z WWW: <<https://publi.cz/books/184/Cover.html>>
- [10] Možnosti recyklace plastů - EnviWeb.cz - zpravodajství o životním prostředí, profesní ekologie, odborné akce [online]. Copyright © 1999 [cit. 16.02.2019]. Dostupné z WWW: <<http://www.enviweb.cz/88360>>
- [11] Recyklace, linky na recyklaci. Publi.cz – platforma pro multimediální eBooky neboli mKnihy [online], 2015, Dostupné z WWW: <<https://publi.cz/books/183/19.html>>
- [12] Ekologické zpracování použitých obalů, Svět tisku [online], 2016, dostupné z WWW: <<https://svettisku.cz>>
- [13] LENFELD, Petr. Technologie II. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-305-8.

- [14] MAŇAS, Miroslav, Michal STANĚK a David MAŇAS. Výrobní stroje a zařízení. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. ISBN 978-80-7318-596-1.
- [15] Bezsítový drtič [online], 2019, dostupné z WWW:< <http://wittmann-group.com>>
- [16] Možnosti recyklace plastů – Industry EU. Evropský oborový portál – Industry EU [online]. Copyright © 2002 [cit. 16.02.2019]. Dostupné z WWW: <https://www.industry-eu.cz/novinky-a-clanky/moznosti-recyklace-plastu_9420>
- [17] SOVA, Miloš a Josef KREBS. Termoplasty v praxi. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-86229-15-7.
- [18] Pyrolýza odpadů – moderní způsob jejich zneškodnění - EnviWeb.cz. EnviWeb.cz - zpravodajství o životním prostředí, profesní ekologie, odborné akce [online]. Copyright © 1999 [cit. 16.02.2019]. Dostupné z WWW: <<http://www.enviweb.cz/94618>>
- [19] Zplyňování – principy a reaktory [online], 2016, dostupné z WWW:< <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>>
- [20] MAŇAS, Miroslav. Výrobní stroje a zařízení. Brno: Vysoké učení technické, 2018. ISBN 80-214-0213-X.
- [21] Stroje pro zpracování polymerních materiálů Publi.cz – platforma pro multimediální eBooky neboli mKnihy [online], 2015, Dostupné z WWW: <<https://publi.cz/books/181/Cover.html>>
- [22] Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů. Publi.cz – platforma pro multimediální eBooky neboli mKnihy [online], 2015, Dostupné z WWW: <<https://publi.cz/books/179/Cover.html>>
- [23] GASTROW, Hans a Hartmut GEMMER. Der Spritzgiess-Werkzeugbau in Beispielen. 2., erw. Aufl. Wien: Hanser, 2018. ISBN 3446120432.
- [24] BOBČÍK, L. a kol. Formy pro zpracování plastů II. díl – Vstřikování termoplastů. 1. vyd. Brno: UNIPLAST, 1999. 212 s.
- [25] Databáze materiálových dat, Dostupné z WWW: <<https://www.campusplastics.com/>>
- [26] ČSN EN ISO 10350-1 | www.technickenormy.cz. Technické normy – ČSN normy | www.technickenormy.cz [online]. Copyright © 2000 [cit. 17.02.2019]. Dostupné z WWW: <<https://www.technickenormy.cz/csn-en-iso-10350-1-plasty-stanoveni-a-prezentace-srovnatelnych-jednobodovych-hodnot-cast-1-materialy-pro-tvareni-1/>>

- [27] ČSN EN ISO 11403-1 | www.technickenormy.cz. Technické normy – ČSN normy | www.technickenormy.cz [online]. Copyright © 2000 [cit. 17.02.2019]. Dostupné z WWW: <<https://www.technickenormy.cz/csn-en-iso-11403-1-plasty-stanoveni-a-prezentace-srovnatelnych-vicebodovych-hodnot-cast-1-mechanicke-vlastnosti-1/>>
- [28] *Zákon 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů: Nařízení vlády 168/1997 Sb. - 179/1997 Sb.* Brno: NOEL 2000, 1997. ISBN 80-86020-17-7.
- [29] KLABUSAYOVÁ, Naděžda. *Zákon o obecné bezpečnosti výrobků: Zákon o technických požadavcích na výrobky: komentář*. Praha: Wolters Kluwer, 2016. Komentáře (Wolters Kluwer ČR). ISBN 978-80-7552-371-6.
- [30] Polyphthalamide – Wikipedia. [online]. Dostupné z WWW: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Polyphthalamide>>
- [31] CALLISTER, William D. a David G. RETHWISCH. *Materials science and engineering: an introduction*. 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2010. ISBN 978-0-470-41997-7.
- [32] Rapid Granulator AB [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.rapidgranulator.com>>
- [33] Schneidmühlen von Wanner Technik GmbH, Wertheim-Reicholzheim. *Schneidmühlen von Wanner Technik GmbH, Wertheim-Reicholzheim* [online]. Dostupné z WWW: <<https://www.wanner-technik.de/>>
- [34] Home – Moretto S.p.A. *Home – Moretto S.p.A.* [online]. Copyright © 2019 Moretto S.p.A. [cit. 16.03.2019]. Dostupné z WWW: <<https://www.moretto.com/>>
- [35] *PALLMANN Industries, Inc. - Top Performance in Size Reduction – Mills, Granulators, Pulverizers, Agglomerators, Recycling.* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.pallmannindustries.com/>>
- [36] ČSN EN ISO 527-2 *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*, Praha, ÚNMZ, 2012
- [37] ČSN EN ISO 178 *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*, Praha, ÚNMZ, 2011
- [38] ČSN EN ISO 179-1 *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část I: Neinstrumentovaná rázová zkouška*, Praha, ÚNMZ, 2010
- [39] Arburg [online], Dostupné z WWW:< <https://www.arburg.com/cs/cz/>>

- [40] Wittmann Battenfeld CZ spol. s.r.o. [online], Dostupné z WWW:<https://www.wittmann-group.com/cs_cz.html>
- [41] Obrázek č. 1, *Polyмеры*, dostupné z WWW:< <https://publi.cz/books/180/04.html>>
- [42] Obrázek č. 2, *Nožový mlýn*, dostupné z WWW:< <http://www.rapidgranulator.com/>>
- [43] Obrázek č. 3, *Talířový nárazový mlýn*, dostupné z WWW:
< <http://www.pallmannindustries.com/>>
- [44] Obrázek č. 4, 5, dostupné z WWW:< https://www.wittmann-group.com/cs_cz.html>
- [45] Obrázek č. 6, *Vstřikovací stroj*, dostupné z WWW:< <https://www.arburg.com/cs/cz/>>
- [46] Obrázek č. 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 a 17, *Fotografie od společnosti UNIPETROL RPA, s.r.o. – POLYMER INSTITUTE BRNO, 2019*

SEZNAM ZKRATEK

PE.....	polyetylen
PP.....	polypropylen
PVC.....	polvinylchlorid
PS.....	polystyren
PMMA.....	polymethylmetakrylát
PET.....	polyetylentereftalát
PA.....	polyamid
ABS.....	akrylonitril-butadien-styren
PC/ABS.....	polykarbonát/akrylonitril – butadien – styren
PC.....	polykarbonát
LDPE.....	nízkohustotní polyetylen
PTFE.....	polytetrafluoretylen
PIB.....	polyisobutylene
TPA.....	kyselina tereftalová
EG.....	etylenglykol
DMT.....	dimethyltereftalát
BHET.....	bis-(2-hydroxyethyl) tereftalát
APP.....	polyesterový polyol
PUR.....	polyuretan
PBTP.....	polybutylentereftalát
PPA.....	polyftalamid
E_t	modul pružnosti v tahu
σ_m	mez pevnosti
ε_{tm}	jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti
ε_{tb}	jmenovité poměrné prodloužení při přetržení
E	modul pružnosti
σ	napětí
ε	poměrné prodloužení
σ_m	mez pevnosti
ε_{tm}	jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti
ε_{tb}	jmenovité poměrné prodloužení při přetržení
F_{max}	největší síla
S_0	původní průřez
E_f	modul pružnosti v ohybu
σ_{fM}	pevnost v ohybu
ε_{fM}	deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu
$M_{0, max}$	maximální ohybový moment
W_0	průřezový modul
a_{cU}	rázová houževnatost
a_{cN}	vrubová houževnatost
E_c	kinetická energie
h	tloušťka
b	šířka
b_N	šířka pod vrubem

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Základní rozdělení polymerů [41]	3
Obrázek 2 Nožový mlýn [42]	13
Obrázek 3 Talířový nárazový mlýn [43]	14
Obrázek 4 Schéma bezsítového drtiče [44]	16
Obrázek 5 Složení řezací komory [44]	17
Obrázek 6 Vstřikovací stroj [45]	24
Obrázek 7 Drť z vtoků aktuální výroby [46]	34
Obrázek 8 Zkušební tělesa [46]	35
Obrázek 9 Forma pro výrobu zkušebních těles [46]	35
Obrázek 10 Měřicí přístroj Instron 4466 [46]	38
Obrázek 11 Přetržení zkušebního tělesa [46]	39
Obrázek 12 Měřicí přístroj Instron 4466 se zkušebním tělesem [46]	40
Obrázek 13 Měřicí přístroj Instron 3366 [46]	44
Obrázek 14 Měřicí přístroj Instron 3366 se zkušebním tělesem [46]	44
Obrázek 15 Měřicí přístroj ZWICK HIT25P [46]	48
Obrázek 16 Měřicí přístroj ZWICK HIT25P se zkušebním tělesem [46]	48
Obrázek 17 Zkušební těleso opatřené vrubem [46]	50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozdíly mezi technologií vstřikování a vyfukování.....	10
Tabulka 2 Výťažnost monomeru z polymeru.....	19
Tabulka 3 Výhřevnost polymerního odpadu.....	21
Tabulka 4 Rozdělení pyrolýzy dle působnosti tepla.....	22
Tabulka 5 Vybrané mechanické vlastnosti materiálu Zytel HTN54G35HSLR NC010	32
Tabulka 6 Vybrané tepelné vlastnosti materiálu Zytel HTN54G35HSLR NC010.....	32
Tabulka 7 Ostatní vlastnosti materiálu Zytel HTN54G35HSLR NC010	33
Tabulka 8 Podmínky zkoušky modulu pružnosti v tahu.....	37
Tabulka 9 Hodnoty zkoušky modulu pružnosti v tahu	38
Tabulka 10 Podmínky zkoušek meze pevnosti, jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení	40
Tabulka 11 Hodnoty zkoušky meze pevnosti	41
Tabulka 12 Hodnoty zkoušky jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti	41
Tabulka 13 Hodnoty zkoušky jmenovité poměrné prodloužení při přetržení	41
Tabulka 14 Podmínky zkoušek modul pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu a deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu.....	43
Tabulka 15 Hodnoty zkoušky modulu pružnosti v ohybu	45
Tabulka 16 Hodnoty zkoušky pevnost v ohybu	45
Tabulka 17 Hodnoty zkoušky deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu	45
Tabulka 18 Podmínky zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles bez vrubu.....	47
Tabulka 19 Hodnoty zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles bez vrubu	49
Tabulka 20 Podmínky zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles opatřených vrubem	50
Tabulka 21 Hodnoty zkoušky rázové houževnatosti zkušebních těles opatřených vrubem.....	51
Tabulka 22 Výsledek zkoušky modulu pružnosti v tahu	52
Tabulka 23 Výsledek zkoušky meze pevnosti	53
Tabulka 24 Výsledek zkoušky jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti	54
Tabulka 25 Výsledek zkoušky jmenovité poměrné prodloužení při přetržení	55
Tabulka 26 Výsledek zkoušky modulu pružnosti v ohybu	56
Tabulka 27 Výsledek zkoušky pevnost v ohybu	57
Tabulka 28 Výsledek zkoušky deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu	58
Tabulka 29 Výsledek zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy zkušebních těles bez vrubu.....	59
Tabulka 30 Výsledek zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy zkušebních těles opatřených vrubem	60

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Výsledek zkoušky modulu pružnosti v tahu	53
Graf 2 Výsledek zkoušky meze pevnosti	54
Graf 3 Výsledek zkoušky jmenovité poměrné prodloužení na mezi pevnosti	55
Graf 4 Výsledek zkoušky jmenovité poměrné prodloužení při přetržení	56
Graf 5 Výsledek zkoušky modulu pružnosti v ohybu	57
Graf 6 Výsledek zkoušky pevnost v ohybu	58
Graf 7 Výsledek zkoušky deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu	59
Graf 8 Výsledek zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy zkušebních těles bez vrubu	60
Graf 9 Výsledek zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy zkušebních těles opatřených vrubem	61